Évaluation de la franchissabilité amont et aval pour l'anguille aux barrages

V. Tremblay, C. Cossette, J.-D. Dutil, G. Verreault et P. Dumont

Direction régionale des Sciences
Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec)
G5H 3Z4

2011

Assessment of upstream and downstream passability for eel at dams

V. Tremblay, C. Cossette, J-D Dutil, G. Verreault, and P. Dumont

Regional Science Branch
Fisheries and Oceans Canada
Maurice Lamontagne Institute
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec)
G5H 3Z4

2011

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 2912

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2912

Pêches et Océans Canada | Fisheries and Oceans Canada

Canada

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques

Les rapports techniques contiennent des renseignements scientifiques et techniques qui constituent une contribution aux connaissances actuelles, mais qui ne sont pas normalement appropriés pour la publication dans un journal scientifique. Les rapports techniques sont destinés essentiellement à un public international et ils sont distribués à cet échelon. Il n'y a aucune restriction quant au sujet; de fait, la série reflète la vaste gamme des intérêts et des politiques de Pêches et Océans Canada, c'est-à-dire les sciences halieutiques et aquatiques.

Les rapports techniques peuvent être cités comme des publications à part entière. Le titre exact figure au-dessus du résumé de chaque rapport. Les rapports techniques sont résumés dans la base de données *Résumés des sciences aquatiques et halieutiques.*

Les rapports techniques sont produits à l'échelon régional, mais numérotés à l'échelon national. Les demandes de rapports seront satisfaites par l'établissement auteur dont le nom figure sur la couverture et la page du titre.

Les numéros 1 à 456 de cette série ont été publiés à titre de Rapports techniques de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada. Les numéros 457 à 714 sont parus à titre de Rapports techniques de la Direction générale de la recherche et du développement, Service des pêches et de la mer, ministère de l'Environnement. Les numéros 715 à 924 ont été publiés à titre de Rapports techniques du Service des pêches et de la mer, ministère des Pêches et de l'Environnement. Le nom actuel de la série a été établi lors de la parution du numéro 925.

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences

Technical reports contain scientific and technical information that contributes to existing knowledge but which is not normally appropriate for primary literature. Technical reports are directed primarily toward a worldwide audience and have an international distribution. No restriction is placed on subject matter and the series reflects the broad interests and policies of Fisheries and Oceans Canada, namely, fisheries and aquatic sciences.

Technical reports may be cited as full publications. The correct citation appears above the abstract of each report. Each report is abstracted in the data base *Aquatic Sciences and Fisheries Abstracts.*

Technical reports are produced regionally but are numbered nationally. Requests for individual reports will be filled by the issuing establishment listed on the front cover and title page.

Numbers 1-456 in this series were issued as Technical Reports of the Fisheries Research Board of Canada. Numbers 457-714 were issued as Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, Research and Development Directorate Technical Reports. Numbers 715-924 were issued as Department of Fisheries and Environment, Fisheries and Marine Service Technical Reports. The current series name was changed with report number 925.

Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 2912

2011

Évaluation de la franchissabilité amont et aval pour l'anguille aux barrages

V. Tremblay [1], C. Cossette[1], J.-D. Dutil, G. Verreault[2] et P. Dumont[2]

Direction régionale des Sciences
Pêches et Océans Canada
Institut Maurice-Lamontagne
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec)
G5H 3Z4

[1] AECOM Tecsult Inc.

[2] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF)

Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2912

2011

Assessment of upstream and downstream passability for eel at dams

V. Tremblay[1], C. Cossette[1], J.-D. Dutil, G. Verreault,[2] and P. Dumont[2]

Regional Science Branch
Fisheries and Oceans Canada
Maurice Lamontagne Institute
850, route de la Mer
Mont-Joli (Québec)
G5H 3Z4

[1] AECOM Tecsult Inc.

[2] Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF)

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada, 2011
© Her Majesty the Queen in Right of Canada, 2011

N° de cat. / Cat. No. Fs 97-6/2912 ISSN 0706-6457 (version imprimée / print version)
N° de cat. / Cat. No. Fs 97-6/2912-PDF ISSN 1488-5379 (version en ligne / online version)

On devra citer la publication comme suit :

Tremblay, V., Cossette, C., Dutil, J.-D., Verreault G. et Dumont P. 2011. Évaluation de la franchissabilité amont et aval pour l'anguille aux barrages Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2912 : x + 73 p.

Correct citation for this publication:

Tremblay, V., Cossette, C., Dutil, J.-D., Verreault G., and Dumont P. 2011. Assessment of upstream and downstream passability for eel at dams. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2912: x + 73 p.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE OF CONTENTS

	Page	
Liste des tableaux	v	List of tables
Liste des figures	vii	List of figures
Liste des annexes	viii	List of appendices
Résumé	ix	Abstract
Préface	x	Preface
1.0 Introduction	1	1.0 Introduction
1.1 Mise en contexte	1	1.1 Background
2.0 Revue de littérature sur la franchissabilité des barrages vers l'amont	4	2.0 Literature review for upstream passability
2.1 Critères d'évaluation de la franchissabilité amont	4	2.1 Assessment criteria for upstream passability
2.1.1 Conditions d'observation	4	2.1.1 Observing conditions
2.1.2 Critères d'évaluation	6	2.1.2 Assessment criteria
3.0 Revue de littérature sur la franchissabilité des barrages vers l'aval	10	3.0 Literature review for downstream passability
3.1 Critères d'évaluation de la franchissabilité aval	10	3.1 Assessment criteria for downstream passability
3.1.1 Types de turbines	12	3.1.1 Type of turbine
3.1.2 Dispositifs de franchissement	13	3.1.2 Passage facilities
3.1.3 Hauteur de chute et présence de fosses	14	3.1.3 Waterfall height and presence of pools
4.0 Méthodes	16	4.0 Methods
4.1 Relations entre les caractéristiques physiques des barrages	18	4.1 Relationships among the physical characteristics of the dams
4.2 Classification des barrages selon leurs caractéristiques physiques	19	4.2 Dam classification based on their physical characteristics
5.0 Établissement de cotes de franchissabilité amont	22	5.0 Establishment of upstream passability ranks
5.1 Description des cotes de franchissabilité amont	22	5.1 Description of upstream passability ranks
6.0 Établissement de cotes de franchissabilité aval	25	6.0 Establishment of downstream passability ranks
6.1 Description des cotes de franchissabilité aval	25	6.1 Description of downstream passability ranks
7.0 Résultats et discussion	26	7.0 Results and discussion
7.1 Répartition des barrages et caractéristiques	26	7.1 Dam distribution and characteristics
7.2 Relations entre les caractéristiques	31	7.2 Relationships among the physical

physiques des barrages
7.3 Classification des barrages selon leurs caractéristiques physiques 33
7.4 Description des deux critères retenus pour l'évaluation de la franchissabilité amont 38
7.4.1 Classes de hauteur de barrage 40
7.4.2 Classes de types de matériaux 41
7.4.3 Description des groupes de barrages selon les deux critères retenus pour la franchissabilité amont 44
7.5 Validation des cotes de franchissabilité amont par photo-interprétation 49
7.6 Description des deux critères retenus pour l'évaluation de la franchissabilité aval 52
7.6.1 Cotes retenues par l'utilisation des barrages (cotes 2 et 3) 53
7.6.2 Cotes retenues pour la hauteur des barrages (cotes 2 et 4) 53
7.6.3 Description des groupes de barrages selon les deux critères retenus pour la franchissabilité aval 55
8.0 Avantages et inconvénients de la procédure retenue 59
9.0 Conclusion et recommandations 62
9.1 Bilan sur les caractéristiques des barrages 62
9.2 Bilan sur la méthode pour évaluer la franchissabilité amont 63
9.3 Bilan sur la méthode pour évaluer la franchissabilité aval 63
9.4 Bilan sur la méthode d'évaluation de la franchissabilité amont et aval 64
10.0 Remerciements 66
11.0 Références 67

characteristics of the dams
7.3 Dam classification based on their physical characteristics 33
7.4 Description of the two criteria selected for the assessment of upstream passability 38
7.4.1 Classes of dam height 40
7.4.2 Classes of material types 41
7.4.3 Description of dam groups based on the two criteria selected for upstream passability 44
7.5 Validation of upstream passability ranks using photo-interpretation 49
7.6 Description of the two criteria selected for the assessment of downstream passability 52
7.6.1 Ranks selected for dam use (ranks 2 and 3) 53
7.6.2 Ranks selected for dam height (ranks 2 and 4) 53
7.6.3 Description of dam groups based on the two criteria selected for downstream passability 55
8.0 Advantages and disadvantages of the selected procedure 59
9.0 Conclusion and recommendations 62
9.1 Summary of dam characteristics 62
9.2 Summary of the upstream passability assessment method 63
9.3 Summary of the downstream passability assessment method 63
9.4 Summary of the upstream and downstream passability assessment method 64
10.0 Acknowledgements 66
11.0 References 67

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1. Description des critères d'évaluation de franchissabilité amont selon Steinbach (2009, modifié de Steinbach 2006).	7
Tableau 2. Classes de franchissabilité des obstacles à la dévalaison de l'anguille (Lelièvre et Steinbach 2008).	11
Tableau 3. Variables numériques et catégoriques retrouvées dans la base de données du Centre d'expertise hydrique du Québec.	17
Tableau 4. Valeur des paramètres utilisés pour le calcul du débit moyen annuel selon la région hydrographique considérée.	18
Tableau 5. Regroupements de types de matériaux et d'utilisation des barrages répertoriés dans la base de données du Centre d'expertise hydrique du Québec.	20
Tableau 6. Distribution des barrages selon leurs caractéristiques en termes de hauteur, de matériaux, et d'utilisation.	29
Tableau 7. Statistiques descriptives pour chacun des groupes de barrages obtenus par l'analyse de groupement hiérarchique effectuée avec toutes les variables catégoriques et les variables continues (hauteur de barrage et capacité de retenue).	36

LIST OF TABLES

Table 1. Description of criteria used to assess uptream passabi ty according to Steinbach (2009, modified from Steinbach 2006).	
Table 2. Passability classes of obstacles for downstream passage of eel (Lelièvre and Steinbach 2008).	
Table 3. Numerical and categorical variables listed in the Centre d'expertise hydrique du Québec database.	
Table 4. Selected parameter values for the calculation of mean annual flow according to the river's hydrological region.	
Table 5. Grouping of material type and dam use for dams listed in the Centre d'expertise hydrique du Québec database.	
Table 6. Dam distribution according to their characteristics in terms of height, materials, and uses.	
Table 7. Descriptive statistics for each group of dams according to the cluster analysis conducted on categorical and numerical variables (dam height, impounding capacity).	

Tableau 8. Critères d'évaluation suggérés pour l'analyse par groupement selon des classes de franchissabilité des obstacles à la montaison de l'anguille (modifié de Steinbach 2006). 39

Tableau 9. Cote de franchissabilité selon les classes de hauteur de barrages et correspondance entre la hauteur de retenue et la hauteur des barrages répertoriés dans la base de données du CEHQ. 41

Tableau 10. Cote de franchissabilité établie pour les types de matériaux utilisés dans la construction des barrages répertoriés dans la base de données du CEHQ. 43

Tableau 11. Résultats de l'analyse de groupement hiérarchique pour la franchissabilité amont. 48

Tableau 12. Répartition des barrages de la base de données du CEHQ par groupe et nombre de barrages ayant fait l'objet d'une photo-interprétation. 51

Tableau 13. Comparaison entre les cotes de franchissabilité attribuées par la combinaison des cotes de matériaux et de hauteurs (analyse de groupement) et celles obtenues par l'examen des photographies. 52

Tableau 14. Cote de franchissabilité aval extrapolée aux données disponibles dans la base de données du CEHQ. 55

Tableau 15. Résultats de l'analyse de groupement pour la franchissabilité aval. 57

Table 8. Suggested assessment criteria for the cluster analysis according to upstream passability classes (modified from Steinbach 2006).

Table 9. Passability rank according to dam height classes and correspondence between dam storage depth and dam height for dams listed in the CEHQ database.

Table 10. Passability rank established for types of material used in dams listed in the CEHQ database.

Table 11. Hierarchical cluster analysis results for upstream passability.

Table 12. Distribution of dams listed in the CEHQ database across groups, and number of dams for which photographs were examined.

Table 13. Comparison between passability ranks assigned through the cluster analysis (height and material ranks) and the photo interpretation.

Table 14. Downstream passability rank for eels projected from CEHQ database variables.

Table 15. Results from the cluster analysis for downstream passability.

LIST DES FIGURES

Page

Figure 1. Barrages répertoriés dans la base de données du Centre d'expertise hydrique (CEHQ). 28

Figure 2. Hauteur moyenne des barrages selon le type de matériaux et d'utilisation. 30

Figure 3. Analyse en composante principale (ACP) sur les variables quantitatives (continues). 32

Figure 4. (a) Analyse de groupement hiérarchique des barrages portant sur 15 variables binaires et 2 variables continues et (b) Indice de validation du nombre de groupements obtenus selon trois critères. Indices: Root-mean-square standard deviation (RMSSTD); Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS). 35

Figure 5. (a) Répartition de l'utilisation des barrages et (b) du type de matériaux en fonction des groupements obtenus par l'analyse de groupement hiérarchique. 37

Figure 6. (a) Analyse de groupement hiérarchique des barrages sur la base de deux variables, les cotes de hauteur du tableau 9 et les cotes associées au type de matériaux du tableau 10 ; (b) Indice de validation du nombre de groupements obtenus selon trois critères. Indices: Root-mean-square standard deviation (RMSSTD); Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS). 46

LIST OF FIGURES

Figure 1. Dams listed in the Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) database.

Figure 2. Mean dam height according to material type and dam use.

Figure 3. Principal component analysis (PCA) on numerical values.

Figure 4. (a) Hierarchical cluster analysis of dams on 15 binary variables and 2 numerical variables and (b) Validation index of numbers of clusters according to three criteria. Indices: Root-mean-square standard deviation (RMSSTD); Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS).

Figure 5. (a) Distribution of dam use and (b) material type as a function of groups established by the hierachical cluster analysis.

Figure 6. (a) Hierarchical cluster analysis of dams based on two criteria (height and material classes, from Tables 9 and 10); (b) Validation index of numbers of clusters according to three criteria. Indices: Root-mean-square standard deviation (RMSSTD); Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS).

Figure 7. Proportion de barrages par catégorie de matériaux (du plus perméable au plus imperméable) dans les différents groupements obtenus par l'analyse de groupement. 47

Figure 8. Répartition des cotes de franchissabilité aval. 58

LISTE DES ANNEXES

Page

Annexe A. Sortie statistique de l'ACP. 71

Figure 7. Proportion of dams by material category (from the most permeable to the most impervious) in groups established by the cluster analysis.

Figure 8. Distribution of downstream passability ranks.

LIST OF APPENDICES

Appendix A. Statistical outpout of PCA.

RÉSUMÉ

Tremblay, V., C. Cossette, J.-D. Dutil, G. Verreault, et P. Dumont. 2011. Évaluation de la franchissabilité amont et aval pour l'anguille aux barrages Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2912 : x + 73 p.

L'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*) connaît un déclin marqué de sa population. La perte d'habitats est un facteur souvent invoqué pour expliquer ce déclin auquel a contribué l'érection de barrages visant à mieux contrôler et utiliser les débits d'eau douce. On estime qu'il y a près de 5600 barrages dans les bassins versants du Saint-Laurent au Québec. La franchissabilité de ces barrages pour l'anguille, en montaison et en dévalaison, a été évaluée à partir des données disponibles dans la base de données sur les barrages du Centre d'expertise hydrique du Québec. Dix-huit pourcents des barrages servent à l'approvisionnement en eau et 13% à la production hydroélectrique, mais plus de 50% sont utilisés à des fins récréatives. La majorité des barrages ont moins de 3 m de hauteur et sont faits de béton ou de terre, mais les caractéristiques des barrages sont très diversifiées. Des cotes de franchissabilité ont été attribuées à chaque catégorie de barrages en fonction de trois critères d'évaluation : la hauteur du barrage, les matériaux qui ont servi à sa construction et l'utilisation qui en est faite. La franchissabilité amont a aussi été évaluée à partir de photos. Bien que les deux méthodes (analyse statistique et photo-interprétation) engendrent certaines disparités, elles permettent dans les deux cas d'identifier les barrages infranchissables pour l'anguille. Il ressort de cette analyse que la problématique de franchissement est plus importante en montaison (amont), qu'elle ne l'est en dévalaison (aval). Intégrées à un outil géomatique (SIG) qui localise les barrages et calcule les pertes d'habitat dans les réseaux hydrographiques, ces cotes de franchissabilité aideront les gestionnaires à mieux cibler leurs interventions.

ABSTRACT

Tremblay, V., C. Cossette, J.-D. Dutil, G. Verreault, and P. Dumont. 2011. Assessment of upstream and downstream passability for eel at dams. Can. Tech. Rep. Fish. Aquat. Sci. 2912: x + 73 p.

The American eel (*Anguilla rostrata)* population has experienced a marked population decline. Habitat loss resulting from dam construction to improve the control and use of freshwater discharge is one of the factors involved. There are some 5600 dams in rivers draining to the St. Lawrence in Quebec. Their passability to eels migrating upstream and downstream has been assessed using the dams database of the Centre d'expertise hydrique du Québec. Eighteen percent of the dams are used for supplying water and 13% for hydroelectricity, but more than 50% are used for recreational purposes. Although the majority of the dams are less than 3 m in height and are made of concrete or earthfill, dams present a great variety of physical characteristics and are used for all kinds of purposes. Passability ranks were assigned to each category of dam based on three assessment criteria: the height of the dam, the materials used in its construction, and its use. Passability to upstream migrants was also assessed from photographs for a subset of dams. The two methods (statistical analysis and the use of photographs) may yield different results, but the two methods were consistent to identify the impassable dams. This analysis shows overall that the problem of passability is more significant for upstream passage than it is for downstream passage. Once added to a geospatial analysis tool (GIS) which locates dams and calculates the surface area of habitats lost in each watershed, passability ranks will assist managers in setting priorities for mitigation.

PRÉFACE

Ce rapport technique résulte de l'octroi d'un contrat de service (R6024) à la firme Aecom Tecsult Inc. Le rapport final no 05-19901 présenté par Aecom Tecsult Inc. à Pêches et Océans Canada en mars 2010 a été adapté et traduit.

PREFACE

This technical report was produced as a result of a service contract (R6024) granted to the firm Aecom Tecsult Inc. The final report No. 05-19901 presented by Aecom Tecsult Inc. to Fisheries and Oceans Canada in March 2010 has been adapted and translated.

1.0 INTRODUCTION

1.1 MISE EN CONTEXTE

Depuis plus d'une vingtaine d'années, on a constaté un déclin de la population d'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata)* dans le système hydrographique du Saint-Laurent. Plusieurs initiatives ont été mises en place afin de restaurer ce stock d'anguilles. Le ministère des Pêches et des Océans du Canada (MPO) développe un outil de gestion se présentant sous la forme d'un système d'information géographique (SIG) afin de localiser et de décrire les bassins versants et les obstacles aux déplacements de poissons. Cet outil permet d'évaluer les gains d'habitats pouvant résulter de la mise en place d'une passe migratoire ou d'un dispositif de franchissement, et les pertes d'habitats pouvant résulter de l'ajout d'un obstacle aux déplacements des poissons.

En eaux douces, la densité d'anguilles diminue progressivement en fonction de la distance à la mer (Smogor et al. 1995, Ibbotson et al. 2002, Imbert et al. 2008). La colonisation des biefs amont des bassins versants par l'anguille est souvent perturbée par la présence d'obstacles d'origines anthropique ou naturelle. Les barrages constituent des obstructions totales ou entrainent des retards dans les déplacements des civelles, des anguillettes et des anguilles jaunes, ce qui se traduit par une raréfaction de l'espèce dans les secteurs amont des bassins versants (Larinier et al. 2006). La dévalaison peut être retardée et les géniteurs (anguilles argentées) retournant à la mer des Sargasses peuvent subir une mortalité directe causée par le passage dans les turbines ou par la hauteur de chute des barrages. Les impacts indirects

1.0 INTRODUCTION

1.1 BACKGROUND

For over twenty years, a decline in the American eel (*Anguilla rostrata)* population has been observed in the St. Lawrence drainage system. Many initiatives have been undertaken to restore the stock. The Department of Fisheries and Oceans Canada (DFO) is developing a Geographic Information System (GIS) tool to locate and describe watersheds and obstacles to fish movements in the watershed. The tool assesses habitat gains that could result from the construction of a fish-way or canal or an escapement device as well as habitat losses that could result from additional obstacles to fish movements.

In freshwater, eel density decreases progressively according to distance from the ocean (Smogor et al. 1995, Ibbotson et al. 2002, Imbert et al. 2008). Colonization of upper reaches of watersheds is often disrupted by the presence of natural and man-made obstacles. Dams induce full blockages or successive delays in the migration of elvers, young eel, and yellow eel, which results in species rarefaction in the more upstream reaches of watersheds (Larinier et al. 2006). Downstream passage can be slowed, and spawners (silver eel) returning to the Sargasso Sea may be subjected to direct mortality caused by passage through turbines or by the dams' hydraulic head. The same indirect impacts (predation, migratory delay) are expected to occur as during upstream passage (Steinbach 2001).

(prédation et retard migratoire) s'enchaînent au même titre que les effets observés à la montaison (Steinbach 2001). Pour ces raisons, les barrages sont l'un des premiers facteurs de perturbation de l'état de la population d'anguilles sur lequel il est possible d'agir à l'échelle d'un bassin versant.

For these reasons, dams are one of the primary factors in the disruption of the eel population on which action can be taken on the scale of a watershed.

Contrairement aux autres espèces telles que les salmonidés, les difficultés de franchissement pour l'anguille ne sont pas évaluées en fonction des différentes conditions de débit et de température, mais plutôt selon les caractéristiques physiques des obstacles en période de migration. Bien que bonne nageuse (Gillis 1998a, 1998b, 2000, Van Ginneken et al. 2005), l'anguille n'a pas la capacité de sauter ni de faire face à des vitesses de courant élevées. Sa capacité de franchir les obstacles est plutôt liée au mouvement de reptation hors de l'eau sur des substrats humides (Legault 1988, Larinier et Travade 1998, Gillis 1998a, 1998b, 2000, Van Ginneken et al. 2005).

Contrary to other species such as salmonids, passage problems for eel are not assessed on the basis of the varying flow and temperature conditions, but rather according to the physical characteristics of the obstacles during migration periods. Although good swimmers (Gillis 1998a, 1998b, 2000, Van Ginneken et al. 2005), eels do not have the capacity to jump or cope with high-velocity currents. Their capacity to surmount obstacles is instead linked to crawling movements out of water on wet substrates (Legault 1988, Larinier and Travade 1998, Gillis 1998a, 1998b, 2000, Van Ginneken et al. 2005).

Le présent rapport poursuit deux objectifs, brosser un tableau des ouvrages pouvant nuire à la libre circulation des poissons et évaluer leur franchissabilité amont et aval pour l'anguille d'Amérique. L'étude évalue la faisabilité d'établir des cotes de franchissabilité amont et aval aux barrages répertoriés dans la base de données géoréférencées du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), organisme qui relève du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP, Gouvernement du Québec). Une fois intégrées à une base de données géoréférencées, les cotes de franchissabilité permettront aux gestionnaires de localiser les ouvrages problématiques pour les déplacements de

This report has two objectives: 1. to provide a description of the man-made obstacles potentially hindering free movements of fish in freshwater, and 2. to assess their upstream and downstream passability for American eel. The study examines the feasibility of assigning upstream and downstream passability ranks based on the data available in the database of the Centre d'expertise hydrique (CEHQ) of the Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP, Government of Quebec). Once available and incorporated into a geodatabase, the passability ranks will enable managers to locate man-made structures impeding American eel movements and to set a course of

l'anguille et d'établir des priorités d'intervention visant soit à récupérer des habitats rendus moins accessibles ou carrément inaccessibles aux anguilles se dirigeant vers l'amont, ou à augmenter l'échappement d'anguilles matures en dévalaison. Il est à noter toutefois que la base de données du CEHQ ne contient aucune information sur la présence et les caractéristiques des turbines aux barrages destinés à des fins de production hydroélectrique.

actions where access has been partially or entirely blocked. Actions are needed both for recovering habitats no longer available to support eel production in freshwater and to increase adult eel escapement to oceanic spawning grounds. However, the CEHQ database does not include any information on the presence and characteristics of turbines at hydroelectric dams.

2.0 REVUE DE LITTÉRATURE SUR LA FRANCHISSABILITÉ DES BARRAGES VERS L'AMONT

2.1 CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA FRANCHISSABILITÉ AMONT

L'Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA) en France s'appuie sur l'indice d'accessibilité d'un réseau hydrographique pour visualiser les points de blocage à la montaison de l'anguille européenne et les séries d'obstacles pouvant alors être à l'origine des faibles densités observées (Baisez et Laffaille 2005) principalement dans les biefs amont des bassins versants.

La base des connaissances sur la franchissabilité amont de l'anguille européenne dérive des travaux d'évaluation des impacts du protocole de ONEMA mis au point par Pierre Steinbach sur le bassin de la Loire (France). La grille de notation de Steinbach est largement utilisée lors des travaux d'évaluation de la franchissabilité amont de l'anguille européenne. Cette grille a servi de prémisse à l'ensemble des travaux traitant de la franchissabilité des ouvrages hydrauliques transversaux par l'anguille dans le sens de la montaison (Steinbach 2006, Larinier et al. 2006, Muchiut et al. 2007, Leprevost 2007, Hoffmann 2008, Lelièvre et Steinbach 2008, Steinbach 2009).

2.1.1 Conditions d'observation

Avant d'établir tout critère d'évaluation du potentiel de franchissement par l'anguille par l'entremise d'une grille de notation, certaines conditions d'observation et d'appréciation doivent être connues et respectées.

2.0 LITERATURE REVIEW FOR UPSTREAM PASSABILITY

2.1 ASSESSMENT CRITERIA FOR UPSTREAM PASSABILITY

The Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA) in France relies on the hydrographic network accessibility index to visualize sites of obstacles to upstream passage for the European eel and the series of obstacles that could be the cause of low densities observed (Baisez and Laffaille 2005) in upper reaches of watersheds.

The knowledge base for upstream passability of European eel is derived from the work assessing the impacts of the ONEMA protocol developed by Pierre Steinbach in the Loire catchment area (France). The Steinbach scoring key is widely used in the assessment of European eel upstream passability. It has been used as a premise for all of the work dealing with eel upstream passage and passability of hydraulic structures (Steinbach 2006, Larinier et al. 2006, Muchiut et al. 2007, Leprevost 2007, Hoffmann 2008, Lelièvre and Steinbach 2008, Steinbach 2009).

2.1.1 Observing conditions

Before establishing any criterion to assess eel passability potential using a scoring key, certain criteria should be met.

D'une part, les conditions d'observation doivent idéalement être adaptées à la période migratoire de l'anguille. La médiane des conditions hydrologiques relevées pendant la période principale de migration de l'anguille devrait être considérée comme représentative des conditions observées lors des vagues de colonisation (Larinier et al. 2006). Au Québec, cette période se déroule habituellement entre la mi-juin et la mi-septembre (Dutil et al. 2009), mais peut aussi être étendue jusqu'à la mi-octobre dans le cours principal du Saint-Laurent (Desrochers 2009). D'autre part, le circuit hydraulique de l'appel migratoire le plus favorable doit être repéré et doit être interprété en fonction du comportement particulier de l'anguille. La capacité de nage de l'espèce étant plutôt limitée à des vitesses d'écoulement laminaire inférieures à 0,5 m/s, la capacité de reptation sur les surfaces mouillées et rugueuses est mise à contribution lors des déplacements (Legault 1988, Legault 1993). Selon Steinbach (2006), le parcours de montaison sélectionné est fonction de trois facteurs d'orientation. Le premier est celui de l'écoulement dominant, soit le chenal le plus actif. Ensuite, le point de déversement le plus amont, soit celui vers lequel s'engagent les migrateurs dans leurs tentatives de franchissement, doit être identifié. Enfin, il suffit d'examiner la proximité de la berge puisque celle-ci peut constituer le cheminement le plus favorable en tenant compte de son effet guide (Steinbach 2006).

First of all, the situation should be assessed during the eel migratory period. The median hydrological conditions identified during the main period of eel migration should be considered as representative of the conditions observed during waves of colonization (Larinier et al. 2006). In the St. Lawrence, this period usually takes place between mid-June and mid-September (Dutil et al. 2009), but may also extend to mid-October in the upper reaches of the St. Lawrence (Desrochers 2009). Second, the most favourable hydraulic circuit for migration must be identified and interpreted taking into consideration the singularity of eel behaviour. Since the species' swimming capacity is limited to laminar flow velocities of less than 0.5 m/s, crawling capacity on wet and rough surfaces is required during migratory periods (Legault 1988, Legault 1993). According to Steinbach (2006), the passage route selected is determined by three orientation factors. The first is dominant flow, or the most active channel. Next, the most upstream point of discharge, i.e., the destination migrators chooses in attempting to surmount obstacles, must be identified. Finally, the proximity of the bank needs to be examined, because the bank may constitute the most favourable route, given that it acts as guide (Steinbach 2006).

Le franchissement d'un obstacle par l'escalade sur un substrat humide comprend trois phases selon Legault (1988). Il s'agit de la sortie de l'eau, de la progression sur la paroi et du retour à l'eau en amont. Toutefois, lorsque la pente est forte, elle ne s'applique qu'aux

According to Legault (1988), surmounting an obstacle by climbing a wet substrate includes three phases: moving out of the water, advancing on the bank, and returning to water upstream. In a strong gradient however, this method of surmounting

individus de taille inférieure à 10 cm, principalement les civelles et les petites anguillettes se trouvant non loin de l'embouchure des cours d'eau.

obstacles is specific to individuals less than 10 cm in length, mainly elvers and small eel often found close to the river mouth.

2.1.2 Critères d'évaluation

Steinbach (2006) évalue la franchissabilité amont des ouvrages selon six classes (Tableau 1), allant de l'obstacle effacé (classe 0) jusqu'au barrage infranchissable (classe 5). L'évaluation consiste à pondérer, par l'entremise d'une grille de notation, les différentes variables qui pénalisent (+) ou encore facilitent (-) le franchissement d'un barrage par l'anguille en montaison. La grille de notation d'impact des obstacles ainsi que la pondération octroyée à chacun de ces critères d'évaluation sont présentées au tableau 1.

Selon Steinbach (2006), il est intéressant d'utiliser la grille d'évaluation principalement pour les barrages de classes intermédiaires, soit les barrages de cotes partiellement franchissables (classe 2) ou difficilement franchissables (classes 3 et 4). En passant en revue tous les facteurs physiques contribuant à mettre en évidence les éléments aidant au franchissement de l'obstacle et ceux renforçant l'effet de l'obstacle, le classement des barrages de classes intermédiaires se précisera. À l'opposé, l'utilisation de la grille de notation afin de valider le classement des barrages de classes extrêmes faciles à discriminer par expertise sur le terrain, soit franchissable sans difficulté apparente (classes 0 et 1) et infranchissable (classe 5), est une alternative moins justifiée.

2.1.2 Assessment criteria

Steinbach (2006) assessed upstream passability based on six classes (Table 1), ranging from eliminated obstacle (class 0) to impassable dam (class 5). The assessment involves the weighting of different variables, using a scoring key that penalizes (+) or facilitates (-) an eel's upstream passage surmounting a dam. The scoring key for obstacle impact and the weighting assigned to each assessment criteria are presented in Table 1.

According to Steinbach (2006), the assessment key is mainly useful for dams in the intermediate classes–those ranked as partially passable (class 2) or almost impassable (classes 3 and 4). A review of all the physical factors listed and which are considered as having a positive or negative impact on passability will help managers to achieve an accurate classification of dams with intermediate passability. On the other hand, using the scoring key to validate the classification of dams which could be ranked easily by field expertise, i.e., dams that are passable without apparent difficulty (classes 0 and 1) and impassable dams (class 5), is not recommended.

Tableau 1. Description des critères d'évaluation de franchissabilité amont selon Steinbach (2009, modifié de Steinbach 2006).

Table 1. Description of criteria used to assess uptream passability according to Steinbach (2009, modified from Steinbach 2006).

Critère d'évaluation / Assessment criterion	Description du critère / Criterion description	Note / Score
Hauteur de chute / Waterfall height (m)	< 0.5 m	1
	0.5 m – 1 m	2
	1 m – 2 m	3
	> 2 m	4
Profil de l'ouvrage / Structure profile	Partie verticale (pente > 5H / 1L) * et / ou rupture de pente très marquée / Verticality of downstream dam face (slope > 5H / 1L) * and / or high sharp slope rupture	1
	Partie très pentue (entre 5H / 1L et 3H / 2L) * et / ou rupture de pente marquée / Highly inclined part (between 5H / 1L and 3H / 2L) * and / or sharp slope rupture	0.5
	Face aval inclinée (pente entre 3H / 2L et 1H / 5L) * / Downstream face inclined (slope between 3H / 2L and 1H / 5L) *	-0.5
	Face aval en pente très douce (pente < = 1H / 5L) * / Downstream face with gentle slope (slope < = 1H / 5L) *	-1
Rugosité / Roughness	Matériaux étanches et lisses / Impervious and smooth materials	1
	Parement aval rugueux (joints creux, mousses) / Downstream face rough (joints, grooves, moss)	-0.5
	Parement aval très rugueux (enroché, dépareillé, végétalisé) / Downstream face highly rough (rocky, heterogenous, vegetated)	-1
Effet berge / Bank effect	Berges à pente favorable (inclinaison de zone de transition avec la berge) / Bank with favorable slope (lateral slope of transition areas near the bank)	-0.5
Diversité / Diversity	Existence d'une voie de passage plus facile / Presence of an easier passage route	-0.5
	Existence d'une voie de passage beaucoup plus facile / Presence of a much easier passage route	-1

Classe de franchissabilité / Classes of Passability	Appréciation du franchissement amont / Assessment of upstream passability
0	Libre circulation / Free passage
1	Franchissable (sans difficulté apparente) / Passable without apparent difficulty
2	Franchissable partiellement / Passable at times
3	Difficilement franchissable / Passable with some difficulty
4	Très difficilement franchissable / Nearly impassable
5	Infranchissable / Impassable

* La pente de l'ouvrage est calculée comme étant le ratio hauteur (H) sur longueur (L) du barrage dans le cours d'eau / Slope is calculated as the height (H) to length (L) ratio of the dam.

Les critères d'évaluation pris en compte par Steinbach lors de l'évaluation de la franchissabilité vers l'amont sont :

- la hauteur de chute;
- la verticalité ou l'inclinaison des parements aval (profil de l'ouvrage);
- le lissage ou la rugosité des surfaces d'écoulement et d'appui (rugosité);
- la verticalité ou l'inclinaison latérale des zones de transition avec la berge (effet berge);
- la diversité des voies de franchissement possibles (diversité).

Se définissant comme étant le dénivelé entre le niveau d'eau en amont et la hauteur d'eau en aval (Muchiut et al. 2007), la hauteur de chute représente fidèlement l'importance d'un obstacle pour le déplacement de l'anguille en intégrant l'ensemble des sources d'impacts liées au dénivelé amont/aval (Steinbach 2009). Il est à noter que Steinbach (2006) considère le critère d'évaluation de la hauteur de chute des barrages en fonction de classes de hauteur (Tableau 1). Toutefois, lors de la validation de la grille de notation de Steinbach (2006) par Leprevost (2007) et Hoffmann (2008), la concordance était plus probante entre les densités d'anguilles et les hauteurs de chute lorsque ces dernières étaient utilisées en valeurs continues (hauteur réelle mesurée) et non sous forme de classes (grille de Steinbach).

Le type de matériaux constituant un barrage influence également le degré de franchissement d'un ouvrage par l'anguille. De fait, cette variable représente la qualité de l'appui que propose le parement aval de l'obstacle.

The assessment criteria considered by Steinbach during the assessment of upstream passability were:

- hydraulic head (waterfall height);
- verticality or slope of downstream dam faces (structure profile);
- smoothness or roughness of discharge and support areas (roughness);
- verticality or lateral slope of transition areas near the bank (bank effect);
- variety of possible passability routes (diversity).

Defined as the difference in elevation between the upstream head and the downstream head (Muchiut et al. 2007), the waterfall height accurately represents the significance of an obstacle for eel, since it integrates all of the possible forms of impacts as a function of upstream/downstream drop (Steinbach 2009). It should be noted that Steinbach (2006) considers the assessment of the waterfall height of dams in terms of height classifications (Table 1). However, during validation of Steinbach's scoring key (2006) by Leprevost (2007) and Hoffmann (2008), the most convincing correlation was found to be between eel densities and waterfall heights, when waterfall heights are used as continuous values (real measured height) and not in the form of classes (Steinbach's key).

The type of material used to build a dam also influences the structure's degree of passability for eel. This variable represents the quality of the support provided by the downstream face of the obstacle. Thus, the rougher

Ainsi, plus le matériau à franchir s'éloigne d'un parement lisse ou plus il est rugueux, plus le franchissement par reptation sera facilité sur des surfaces mouillées (Steinbach 2006, Muchiut et al. 2007), et ce, selon l'axe migratoire le plus favorable à l'espèce. La grille de notation de Steinbach (2006, 2009) identifie ce critère d'évaluation comme étant la rugosité. En plus de la nature des matériaux, le potentiel de présence de mousses ou d'algues peut interférer sur la franchissabilité de l'obstacle. Les mousses favorisent la création de points d'appui lors de la reptation, alors que les algues apparaissent plutôt néfastes en supprimant les aspérités du substrat (Legault 1988).

the surface and material of the face to be surmounted, the easier it will be for eel to crawl up the face (Steinbach 2006, Muchiut et al. 2007) following the most favourable passage route for the species. Steinbach's scoring key (2006, 2009) identifies this criterion as roughness. In addition to the nature of the material, the potential presence of mosses or algae can interfere with the obstacle's passability. Mosses create anchoring points for crawling, whereas algae are apparently harmful since they eliminate the substrate's roughness (Legault 1988).

Steinbach (2006, 2009) a également retenu le profil de l'ouvrage, soit sa pente ou le ratio de sa hauteur sur sa longueur dans le cours d'eau, comme étant un critère d'évaluation déterminant sur le franchissement d'un obstacle par l'anguille. Enfin, la présence de berges à inclinaison latérale favorable et la présence de voies de passage plus faciles peuvent certes aider au franchissement par l'espèce (Tableau 1). L'aménagement de zones favorisant la reptation des anguilles le long des berges est d'ailleurs un moyen de restauration de la montaison de l'anguille proposé par Legault (1993).

Steinbach (2006, 2009) also selected the profile of the structure, i.e., its slope in terms of its height/length ratio in the watercourse, as a decisive assessment criterion for the passability of an obstacle by eel. Finally, the presence of favourable laterally sloped banks and the presence of easier passage routes can certainly help the species surmount obstacles (Table 1). Legault (1993) proposed the development of zones that favour the crawling of eel along banks as a means of restoring the passage of eel.

3.0 REVUE DE LITTÉRATURE SUR LA FRANCHISSABILITÉ DES BARRAGES VERS L'AVAL

Il est à noter que la présence de turbines ne pouvait faire partie des critères retenus dans l'établissement des cotes de franchissabilité aval de la présente étude, cette information (présence de turbines et leurs impacts) n'étant pas disponible systématiquement dans la base de données du CEHQ. Il s'agit d'une différence par rapport à l'évaluation européenne, puisque celle-ci inclut à la grille d'évaluation des obstacles les taux de mortalités induits par les turbines lors de la dévalaison.

3.1 CRITÈRES D'ÉVALUATION DE LA FRANCHISSABILITÉ AVAL

La franchissabilité d'un obstacle vers l'aval est tributaire de la capacité de nage du poisson et du comportement de l'espèce ciblée, de même que des conditions hydrauliques et physiques des prises d'eau (Larinier 2000). Le passage dans une turbine induit des mortalités significatives (Larinier et Dartiguelongue 1989). Lorsque les anguilles peuvent emprunter les évacuateurs de crues, les vannes et les déversoirs, les mortalités et blessures sont généralement plus faibles. Toutefois, le suivi des conditions prévalant dans un exutoire de dévalaison démontre que les mortalités engendrées peuvent y être considérables en raison des vitesses atteintes, soit plus de 9.0 $m \cdot s^{-1}$ (Legault et al. 2003).

Dans la littérature, les travaux de Larinier et al. (2006), Muchiut et al. (2007) et Lelièvre et Steinbach (2008) traitent de la franchissabilité des ouvrages vers l'aval. Néanmoins, seuls Lelièvre et Steinbach (2008) évaluent cette franchissabilité par

3.0 LITERATURE REVIEW FOR DOWNSTREAM PASSABILITY

It should be noted that the presence of turbines is not among the criteria selected for establishing downstream passability ranks in this study, since this information (presence of turbines and their impacts) is not systematically available in the CEHQ database. This is a disparity with respect to the European assessment, which includes the mortality levels caused by turbines during downstream passage in its obstacle assessment grid.

3.1 ASSESSMENT CRITERIA FOR DOWNSTREAM PASSABILITY

The downstream passability of an obstacle for fish depends on the swimming capacity and the behaviour of the targeted species as well as on the hydraulic and physical conditions of water intakes (Larinier 2000). Passage through a turbine causes significant mortalities (Larinier and Dartiguelongue 1989). When eels are able to pass dams through outlet structures, gates, and spillways, there are fewer mortalities and injuries. However, the monitoring of an instream flow pipe shows that mortalities may be considerable because of the velocities reached, i.e., over 9.0 $m \cdot s^{-1}$ (Legault et al. 2003).

In the literature, the works of Larinier et al. (2006), Muchiut et al. (2007), and Lelièvre and Steinbach (2008) deal with the downstream passability of structures. However, only Lelièvre and Steinbach (2008) assess

des poissons migrateurs selon des classes bien définies. Cinq classes ont été créées en vue d'estimer le taux de mortalité globale associée au flux dévalant au passage des obstacles (barrage et microcentrale ; seuil ou barrage) sur la Sioule (Tableau 2). Le taux de mortalité prend en compte divers éléments, soit la part de débit transitant par des ouvrages d'évacuation en période de dévalaison, la taille moyenne des poissons dévalant, l'espacement entre les barreaux des grilles à l'amont des turbines, la présence et la fonctionnalité hydraulique et biologique des exutoires situés à l'amont des grilles et les caractéristiques des turbines (chute nominale, débit, type de turbine, diamètre de la roue, vitesse de rotation, nombre et écartement des pales). Cette évaluation de l'impact en dévalaison requiert nécessairement que des informations sur la présence, le type (Kaplan, Francis) et le nombre de turbines soient connus pour chacun des ouvrages. L'existence d'un système de dévalaison (grilles fines, prise d'eau favorable au passage du poisson, etc.) et le débit turbiné sont également des informations pertinentes.

passability based on clearly defined classes. Five classes were used to assess eel mortality rate during downstream passage at obstacles (micro hydropower dam, and sill or dam) on the Sioule River (Table 2). The mortality rate takes into account various elements, i.e., the portion of the spill flow from structures during downstream migration periods, the average size of migrating fish, the space between the bars of the screens upstream of the turbines, the presence as well as the hydraulic and biological functionality of the outlets located upstream of the screens, and the characteristics of the turbines (nominal head, throughput, type of turbine, runner diameter, rotational speed, number of blades). This assessment of the impact on downstream migration requires information on the presence, the type (i.e., Kaplan, Francis), and the number of turbines at each structure. The existence of systems for safer passage (e.g., fine screens, "fish-friendly" intakes), and turbine throughput also constitute pertinent information.

Tableau 2. Classes de franchissabilité des obstacles à la dévalaison de l'anguille (Lelièvre et Steinbach 2008).

Table 2. Passability classes of obstacles for downstream passage of eel (Lelièvre and Steinbach 2008).

Classe de franchissabilité / Classes of passability	Taux de mortalité / Mortality rate (%)
1	< 3%
2	3% – 10%
3	10 % – 25%
4	25 % – 50%
5	> 50%

Selon Larinier et al. (2006), il existe un taux d'échappement susceptible d'être très variable suivant l'ouvrage considéré puisque toutes les anguilles en dévalaison ne transitent pas par les turbines, lorsque celles-ci sont présentes. Ce taux peut varier en fonction de l'équipement de l'ouvrage, de la configuration de la prise d'eau, et des conditions hydrologiques en période de dévalaison. Larinier et al. (2006) soumettent l'hypothèse que les pourcentages respectifs des anguilles transitant par les turbines et par les barrages seront voisins de ceux des débits turbinés et déversés lors des épisodes de dévalaison.

3.1.1 Types de turbine

Les mortalités dans les turbines varient fortement en fonction de leurs caractéristiques, soit celle de la roue (diamètre, vitesse de rotation, etc.), et de leur régime de fonctionnement, de même que la hauteur de chute ainsi que de l'espèce et de la taille du poisson concerné (Travade 2005). Les mortalités chez l'anguille en dévalaison peuvent être importantes. Puisque les anguilles argentées du bassin hydrographique du Saint-Laurent sont celles atteignant les plus grandes tailles à l'argenture en Amérique du Nord (Verreault et al. 2003, Tremblay 2009), elles présentent un taux de mortalité élevée lors de leur passage dans les turbines. Desrochers (1995) a évalué un taux de mortalité variant entre 16% et 24% chez des anguilles de taille moyenne de 88 cm lors de leur passage à travers deux types de turbines présentes au barrage de Beauharnois. À la centrale de Moses-Saunders, le taux de mortalité a été estimé à 26,4% chez des anguilles de taille moyenne de 102 cm (Normandeau Associates et Skalski

According to Larinier et al. (2006), there is an escapement rate that is likely to be highly variable depending on the structure considered; not all eels transit through turbines when turbines are present. These rates can vary depending on the facilities at the structure, the configuration of the water intake, and the hydrological conditions during the downstream migration period. Larinier et al. (2006) suggest that the respective percentages of eel traversing the turbines and the dams will approximate those of turbine flow and spill flow during episodes of downstream migration.

3.1.1 Type of turbine

The mortalities in turbines vary widely as a function of their characteristics, e.g., runner diameter, rotational speed, and of their operational regimen as well as waterfall height and the species and size of the fish concerned (Travade 2005). Eel migrating downstream could be subjected to significant mortality. Since eel become sexually mature at a larger size in the St. Lawrence than in any other watershed in North America (Verreault et al. 2003, Tremblay 2009), they suffer a high rate of mortality in turbines. Desrochers (1995) assessed a mortality rate ranging from 16% to 24% for eels of an average size of 88 cm during their passage through two types of turbines present in the Beauharnois dam on the St. Lawrence River. At the Moses-Saunders generating station, upstream of Beauharnois, the mortality rate has been estimated to be 26.4% for eels of an average size of 102 cm (Normandeau Associates and Skalski

2000). En combinant les mortalités engendrées par les turbines des deux ouvrages (Moses-Saunders et Beauharnois), Verreault et Dumont (2003) confirment une réduction du taux d'échappement de l'ordre de 40%. Ces mortalités cumulatives représenteraient près de 75% de la mortalité d'origine anthropique chez l'anguille en dévalaison (Verreault et Dumont 2003). Chez l'anguille européenne, les mortalités minimales ont été évaluées entre 15 et 20% dans les très grosses turbines de basse chute, mais ce taux peut s'élever à 100% dans les micro-centrales équipées de turbines de plus petites tailles (Larinier et Dartiguelongue 1989, Larinier et Travade 1999, Travade 2005).

3.1.2 Dispositifs de franchissement

La mise au point de dispositifs spécifiques destinés à limiter l'entraînement des poissons migrateurs en dévalaison dans les prises d'eau des centrales hydroélectriques est récente (Travade 2005). D'ailleurs, les dispositifs de dévalaison sont difficiles à mettre en place et sont toujours à l'étude (Travade 2005, Solomon et Beach 2004), notamment dans le cas des grandes centrales hydroélectriques. Les activités de capture et de transport des anguilles assurent que toutes les anguilles capturées évitent le passage à travers les turbines et la mortalité associée, et ce, jusqu'au point de mise à l'eau (Richkus et Dixon 2003). De concert avec le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec (MRNF), de l'Ontario (OMNR) et le MPO, la compagnie Ontario Power Generation (OPG) évalue présentement cette méthode à ses installations de Moses-Saunders dans le haut Saint-Laurent.

2000). Combining the mortalities caused by the turbines of both structures (Moses-Saunders and Beauharnois), Verreault and Dumont (2003) confirm a reduction in the escapement rate of 40%. These cumulative mortalities would represent nearly 75% of human-induced mortality in eels migrating downstream (Verreault and Dumont 2003). In European eel, minimum mortality was estimated to be 15–20% in the very large low-head turbines, but this rate may be 100% in micro-power stations equipped with smaller turbines (Larinier and Dartiguelongue 1989, Larinier and Travade 1999, Travade 2005).

3.1.2 Passage facilities

The development of specific facilities designed to limit the entrainment of downstream migrants into the intakes of hydroelectric power stations is recent (Travade 2005). Moreover, downstream passage facilities are difficult to introduce and continue to be studied (Travade 2005; Solomon and Beach 2004), particularly in the case of large hydroelectric power stations. Trap and transfer ensures that all eels captured will avoid turbine passage and associated mortality (Richkus and Dixon 2003). This method is currently being assessed by OPG (Ontario Power Generation) at the Moses-Saunders dam in the upper St. Lawrence, in collaboration with the Québec Ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF), Ontario Ministry of Natural Resources (OMNR), and DFO.

Des technologies comportementales étudiées par Richkus et Dixon (2003), seuls les lumières et les infrasons (<100 Hz) ont donné des résultats. Néanmoins, afin d'empêcher le passage des poissons par les turbines, une barrière physique peut dans certains cas être installée au droit des prises d'eau des petites centrales. Il s'agit de grilles fines de mailles inférieures à la taille des anguilles, et qui sont installées temporairement ou en permanence à l'entrée des prises d'eau. Cette barrière est associée à un exutoire de dévalaison (ou *by-pass* en anglais) permettant aux poissons de contourner la centrale et rejoindre le bief aval. Néanmoins, l'installation de telles grilles requiert des vitesses d'approche suffisamment faibles afin de permettre au poisson de nager assez longtemps jusqu'à la découverte de l'exutoire, et d'éviter le placage sur les grilles (Larinier 2000, Travade 2005). Le jumelage d'un exutoire de fond à un système de grilles fines est efficace au franchissement par l'anguille sur la rivière Rimouski (Therrien et Verreault 1998). Toutefois, en Nouvelle-Zélande, les anguilles dévalantes ont préféré passer par le déversoir et non par l'exutoire de dévalaison quand le barrage déversait (Boubée et Williams 2006).

3.1.3 Hauteur de chute et présence de fosses

La hauteur de chute est une variable à prendre en compte autant dans l'évaluation de l'impact en montaison que lors de la dévalaison. De fait, en montaison la hauteur de chute limite l'accès aux habitats en amont, alors qu'en dévalaison, la hauteur de chute conditionne le taux de mortalité des anguilles argentées en chute libre. En

Of the behaviour technologies examined by Richkus and Dixon (2003), only light and infrasound (<100 Hz) have demonstrated some level of effectiveness for the American eel. Nevertheless, in order to prevent the passage of fish in turbines, physical barriers may also be used in some cases. A physical barrier can be installed on water intakes of small generating stations. These are fine screens made of mesh smaller than the eel that are permanently or temporarily installed on water intakes. This barrier is associated with a by-pass allowing fish to circumvent the plant and reach the tailbay. Nevertheless, the installation of this kind of screen requires sufficiently low approach velocities to allow fish to reach the opening of the outlet and avoid impingement on the screens (Larinier, 2000, Travade 2005). The pairing of a bottom outlet with a system of fine screens is effective for eel passage on the Rivière Rimouski (Therrien and Verreault 1998). However, in New Zealand, eels migrating downstream preferred to traverse the free weir and not the by-pass when the dam overflowed (Boubée and Williams 2006).

3.1.3 Waterfall height and presence of pools

Waterfall height is a variable to be taken into consideration for the assessment of impact both on upstream and downstream passage. During upstream passage, the waterfall height limits access to upstream habitats, whereas during downstream passage, the waterfall height affects the mortality rate caused by the free fall of

situation de chute libre, le poisson d'une taille supérieure à 60 cm atteint une vitesse critique (16 $m \cdot s^{-1}$) à partir d'une hauteur de chute de 13 m (Larinier et Travade 1999, Larinier et Travade 2002). Il s'agit donc de la hauteur de chute limite pour une anguille argentée. Lors de la dévalaison, les anguilles argentées grande taille sont plus vulnérables que ce soit dans un déversoir libre ou une conduite forcée (Larinier 2000). Il est néanmoins plus sécuritaire pour un poisson de dévaler par un déversoir libre lorsque la profondeur d'eau à l'aval est suffisante. Ainsi, la présence d'une fosse de profondeur appréciable à l'aval des barrages limiterait les dommages lors de la dévalaison (Travade 2005).

silver eels. In a situation of free fall, a fish over 60 cm in length reaches a critical velocity (16 $m \cdot s^{-1}$) from a waterfall height of 13 m (Larinier and Travade 1999, Larinier and Travade 2002). That height was proposed as the threshold limit of the waterfall height for a silver eel. Due to their large size, silver eels are as much at risk in a free weir as in a directed water column situation (Larinier 2000). However, it is safer for a fish to migrate through a free weir where depth at the foot of the dam is adequate. Thus the presence of a pool of considerable depth downstream of the dams would minimize damage during downstream passage (Travade 2005).

4.0 MÉTHODES

La franchissabilité des barrages a été évaluée par des experts utilisant une grille d'évaluation comprenant quatre niveaux de difficulté à la montaison et à la dévalaison.

Dans ce rapport, les termes *note* et *classe* de franchissabilité font référence aux travaux de Steinbach, alors que le terme *cote* de franchissabilité est propre au présent rapport. Néanmoins, nous référons à des *classes* lorsque des groupes ont été formés afin d'établir des *cotes* de franchissabilité selon un critère d'évaluation spécifique (par exemple pour la hauteur, des *classes* ont été établies à : <1,0 m; 1,0 m à 2,0 m; etc.).

La base de données du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, gouvernement du Québec) contient à la fois des variables numériques et des variables catégoriques (Tableau 3). Les variables qui ont été retenues pour les analyses statistiques sont la hauteur du barrage, la hauteur de retenue, la longueur de l'ouvrage, la capacité de retenue, le débit calculé, le type de matériaux (variable *type de barrage*) et l'utilisation du barrage (variable *utilisation*). Parmi les variables numériques, seule la hauteur de barrage était disponible pour chacun des barrages à l'étude.

4.0 METHODS

The passability of dams was assessed by expert opinion based on an assessment grid comprising four levels of difficulty for upstream and downstream passage.

In this report, the terms *score* and *class* of passability refer to the work of Steinbach, while the term passability *rank* is specific to this report. Nevertheless, we also refer to *classes* when describing groups formed to assign passability *ranks* based on a specific assessment criterion (for instance, *classes* for height were established as: <1.0 m; 1.0 m to 2.0 m; and so on).

The Centre d'expertise hydrique du Québec database (CEHQ, Ministère du développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Gouvernement du Québec) contains both numerical and categorical variables (Table 3). The variables selected for statistical analyses are dam height, dam storage depth, structure length, impounding capacity, calculated flow, material type (*dam type* variable), and dam use (*use* variable). Of the numerical values, only the dam height was available for each of the dams being studied.

Tableau 3. Variables numériques et catégoriques retrouvées dans la base de données du Centre d'expertise hydrique du Québec.

Table 3. Numerical and categorical variables listed in the Centre d'expertise hydrique du Québec database.

Variables numériques / Numerical Variables	Variables catégoriques / Categorical Variables
• Hauteur de barrage / Dam height (5,443 barrages / dams) • Hauteur de retenue / Dam storage depth (4,974 barrages / dams) • Longueur du barrage / Structure length (5,296 barrages / dams) • Capacité de retenue / Impounding capacity (5,419 barrages / dams) • Débit calculé / Calculated flow (3,525 barrages / dams)	• Type de matériaux composant le barrage / Dam material type (5,443 barrages / dams) • Type d'utilisation associée au barrage / Dam use (5,443 barrages / dams) • Type de sol sur lequel est érigé le barrage / Dam bedrock base (5,443 barrages / dams) * • Type de contenance du barrage / Dam capacity (5,443 barrages / dams) *

* Variables non utilisées pour les analyses statistiques en raison du caractère imprécis des caractéristiques inscrites pour la majorité des barrages pour les types de sol et de contenance (par exemple pour le type de sol : alluvion ou de nature inconnue). / Variables not used for statistical analyses because of imprecise characteristics for most of the dams (for example for bedrock base: alluvium or unknown nature)

Le débit moyen annuel à chacun des barrages a été calculé selon la méthode et les équations disponibles (Caissie 2006, Caissie et Robichaud 2009). Le débit est calculé à partir de la superficie drainée en amont de l'ouvrage selon l'équation suivante :

$$MAF = a(DA)^b$$

où MAF (*mean annual flow*) est le débit moyen annuel et DA (*drainage area*) est la superficie drainée. Les coefficients a et b sont dérivés d'une relation linéaire entre ces deux variables transformées (log-log). Puisque les valeurs de a et b varient selon la région hydrographique auquelle appartient la rivière considérée, celles-ci ont été utilisées en fonction de l'appartenance d'un barrage à une région hydrographique donnée (Tableau 4).

The mean annual flow at each dam was calculated using the method and equations available (Caissie 2006, Caissie and Robichaud 2009). The flow is calculated based on the area drained upstream of the structure using the following equation:

$$MAF = a(DA)^b$$

where MAF is the mean annual flow and DA the drainage area. The coefficients a and b are derived from a linear relation between these two log-transformed variables (log-log). Since the values of a and b vary according to the hydrological region to which the considered river belongs, they are applied according to the hydrological region to which the dam belongs (Table 4).

Tableau 4. Valeur des paramètres utilisés pour le calcul du débit moyen annuel selon la région hydrographique considérée.

Table 4. Selected parameter values for the calculation of mean annual flow according to the river's hydrological region.

Note : Les régions hydrographiques sont celles décrites par le CEHQ / Hydrological regions are from the Centre d'expertise hydrique du Québec

Région hydrographique / Hydrological region	a	b	R^2
R3, R4, R8, R9	0.021	0.971	0.981
R1, R2, R5, R6, R7, R10, R12	0.031	0.954	0.989

Source : D. Caissie, MPO / DFO (Moncton)

R1 : Baie des Chaleurs et Percé / Chaleurs Bay and Percé ; R2 : Saint-Laurent sud-est / southeast St. Lawrence; R3 : Saint-Laurent sud-ouest / / southwest St. Lawrence; R4 : Outaouais et Montréal / Outaouais and Montreal; R5 : Saint-Laurent nord-ouest / / northwest St. Lawrence; R6 : Saguenay et Lac Saint-Jean / Saguenay and Lac St-Jean; R7 : Saint-Laurent nord-est / / northeast St. Lawrence; R8 : Baies de Hannah et Rupert / Hannah Bay and Ruper Bay; R9 : Baies James et d'Hudson / James Bay and Hudson Bay ; R10 : Baie d'Ungava / Ungava Bay; R12 : îles du fleuve Saint-Laurent / St. Lawrences Islands (tiré de / from http://www.cehq.gouv.qc.ca /). Les coefficents sont actuellement inconnus pour la région hydrographie R0, soit celle qui comprend le fleuve Saint-Laurent de la frontière ontarienne à la pointe ouest de l'Ile d'Anticosti / Coefficients are currently unknown for hydrological region R0, e.g., the St. Lawrence River from the Ontario border to the west point of Anticosti Island (D. Caissie, MPO / DFO, comm. pers. / pers.comm. 1er février / 1 February, 2010).

4.1 RELATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DES BARRAGES

Afin de bien cerner les relations existant entre les caractéristiques physiques des barrages, une analyse en composante principale a été effectuée (ACP). Cette méthode permet de déterminer quelles variables forment un groupe indépendant d'un autre groupe de variables (Tabachnick et Fidell 2001). L'ACP a été effectuée uniquement sur les variables numériques pour en décrire les axes de variabilité. Les données ont été préalablement transformées ($\log_{10}$). Une rotation orthogonale (de type « *Varimax* ») a été appliquée sur les facteurs afin de diminuer le nombre de variables ayant un coefficient élevé sur chaque facteur (SYSTAT 12, 2007).

4.1 RELATIONSHIPS AMONG THE PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE DAMS

In order to properly identify the relationships existing among the physical characteristics of the dams, a principal component analysis (PCA) was conducted. This method makes it possible to determine which variables form a group that is independent of another group of variables (Tabachnick and Fidell 2001). The PCA was conducted only on numerical values to determine the variability axes. The data were log-transformed prior to analysis ($\log_{10}$). An orthogonal rotation (*Varimax*) was applied to the factors in order to reduce the number of variables having a high coefficient on each factor (SYSTAT 12, 2007).

4.2 CLASSIFICATION DES BARRAGES SELON LEURS CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES

Un des objectifs de l'étude était de définir des groupements de barrages présentant une certaine similarité dans leurs caractéristiques afin d'attribuer à chaque groupe une cote de franchissabilité amont et aval pour l'anguille. Pour ce faire, une analyse de groupement hiérarchique a été effectuée à partir des caractéristiques des barrages. Cette méthode a été retenue car elle permet d'associer des objets de telle sorte que deux objets formant un groupe soient semblables entre eux, mais pas tout à fait semblables aux objets formant un autre groupe (Řezanková 2009).

Les variables qualitatives dans la base de données du CEHQ sont dites catégoriques nominales, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent être ordonnées; par exemple un barrage en béton-gravité n'a pas plus ou moins d'importance qu'un barrage en terre. Selon He et al. (2005), il est préférable de produire deux analyses distinctes lorsque la base de données contient à la fois des variables quantitatives et qualitatives, mais il est possible de contourner ce problème. Pour ce faire, les 20 types de matériaux et les 14 types d'utilisation ont été préalablement regroupés en un nombre plus restreint de catégories (Tableau 5). Pour chaque catégorie, une variable binaire (0,1) a été produite. Ces nouvelles variables peuvent alors être considérées comme quantitatives (Ralambondrainy 1995 cité dans Huang 1998, Řezanková 2009).

4.2 DAM CLASSIFICATION BASED ON THEIR PHYSICAL CHARACTERISTICS

One of the objectives of this study was to define groups of dams whose characteristics present a degree of similarity in order to assign an upstream and downstream passability rank to each group for eels. To do so, a hierarchical cluster analysis was conducted based on dam characteristics. This method was selected because it makes it possible to associate objects so that two objects forming a group are similar to each other but not entirely similar to objects forming another group (Řezanková 2009).

The qualitative variables of the CEHQ database are termed nominal categorical, which means they cannot be ordered; for example, a concrete gravity dam has no greater or lesser importance than an earthfill dam. According to He et al. (2005), it is preferable to produce two distinct analyses when the database contains both qualitative and quantitative data, but it is possible to get around this problem. To do so, the 20 types of materials and the 14 types of use were first grouped into a smaller number of categories (Table 5). For each category a binary variable (0/1) was produced. These new variables can be considered quantitative (Ralambondrainy 1995 cited in Huang 1998, Řezanková 2009).

Tableau 5. Regroupements de types de matériaux et d'utilisation des barrages répertoriés dans la base de données du Centre d'expertise hydrique du Québec.

Table 5. Grouping of material type and dam use for dams listed in the Centre d'expertise hydrique du Québec database.

Variable	Type selon la base de données / Type according to the database	Catégorie / Category	Correspondance dans la base de données / Database correspondence
Matériaux / Materials	Béton-gravité / Concrete-gravity; béton-gravité remblayé / Filled concrete-gravity; béton-voûte / arch (vault) dam; écran de béton à l'amont d'une digue de terre / concrete skin plate; contreforts de béton / concrete buttresses	Béton / Concrete	1
	Caissons de bois remplis de pierres; caissons de bois remplis de terre / Timber cribs (earthfill; rockfill)	Caissons / Timber crib	2
	Écran de palplanches; caissons de palplanches; palplanches en acier / Sheet pile skin plate; sheet pile cribs; steel sheet pile	Palplanches / Sheet pile	3
	Contreforts de bois (caissons; chandelles) / Wood buttresses	Contreforts en bois / Wood buttresses	4
	Déversoir libre (carapace de béton) / Free weir (concrete)	Déversoir en béton / Concrete free weir	5
	Déversoir libre en enrochement / Rockfill free weir	Déversoir enrochement / Rockfill free weir	6
	Enrochement / Rockfill	Enrochement / Rockfill	7
	Enrochement / Rockfill (masque amont de béton / concrete flow retarding facing); enrochement / rockfill (masque amont de terre / earthfill flow retarding facing); enrochement / rockfill (zoné écran d'étanchéité / skin plate); enrochement / rockfill (zoné noyau / core)	Enrochement imperméable / Impervious rockfill	8
	Terre / Earthfill	Terre / Earthfill	9
Utilisation / Use	Agriculture/Agriculture; prise d'eau / water intake; réserve d'incendie / fire reserve; flottage de bois / old river driving	Approvisionnement en eau / Supplying water	1
	Fins environnementales / environmental purposes; site historique / historic site; étang (épuration; décantation) / sewage pond; pisciculture; autre ou inconnu / others or unknown	Autres / Others	2
	Faune / Wildlife	Faune / Wildlife	3
	Contrôle des inondations / Flood control	Protection inondations / Flood protection	4
	Hydroélectricité / Hydroelectricity	Hydroélectricité / Hydroelectricity	5
	Récréatif et villégiature / Recreation and vacational facilities	Récréatif / Recreational	6

L'analyse de groupement a été effectuée sur les variables transformées (Log_{10}) en utilisant la distance euclidienne comme mesure de dissimilarité et l'algorithme de jonction de type « *Average* » comme

The cluster analysis was conducted on log transformed standardized variables (Log_{10}) using Euclidean distance as a measure of dissimilarity and the average junction algorithm as

méthode de groupement; l'utilisation de cette dernière est indiquée lorsque les groupements ne sont pas clairement définis (Quinn et Keough 2002, Garson 2010). Étant donné le très grand nombre de barrages répertoriés dans la base de données, il devient difficile de déterminer le nombre de groupements obtenus par le seul examen des graphiques. SYSTAT 12 (2007) suggère d'effectuer une analyse avec l'option « *Leaf* » en définissant au préalable un nombre de nœuds (jonction de deux barrages ou groupes de barrages). Pour ce faire, il est pertinent d'effectuer une validation par indice sur les groupements obtenus et ainsi de définir un nombre de nœuds selon lesquels les barrages seront distribués en fonction de leurs similarités. Trois indices ont été retenus pour la validation, selon les recommandations spécifiées dans SYSTAT 12 (2007) : *Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS),* et *Root-mean-square standard deviation (RMSSTD).*

a clustering method; the use of this method is indicated when clusters are not clearly defined (Quinn and Keough 2002, Garson 2010). Given the large number of dams listed in the database, it becomes difficult to determine the number of clusters obtained solely through the examination of graphs. SYSTAT 12 (2007) suggests conducting an analysis with the Leaf plot option by first defining a number of nodes (junction of two dams or two groups of dams). To do so, a validation per index on the clusters obtained should be conducted to define a number of nodes according to which the dams are distributed based on their similarities. Three indices were selected for the validation, based on the recommendations described in SYSTAT 12 (2007): *Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS),* and *Root-mean-square standard deviation (RMSSTD).*

5.0 ÉTABLISSEMENT DE COTES DE FRANCHISSABILITÉ AMONT

5.1 DESCRIPTION DES COTES DE FRANCHISSABILITÉ AMONT

Les critères utilisés chez l'anguille européenne pour l'évaluation de la franchissabilité amont ont été mis à contribution pour établir la grille de franchissabilité pour la montaison de l'anguille d'Amérique. Néanmoins, lors de l'évaluation de la faisabilité d'utilisation des critères de Steinbach (2006, 2009), certains de ceux-ci ont été modifiés et leurs notes ajustées afin d'être représentatifs des caractéristiques des obstacles rencontrés dans les bassins versants à l'étude.

D'une part, la classe 0 de l'obstacle effacé a été exclue de la grille puisque la présente étude vise uniquement l'évaluation de la franchissabilité amont en regard des barrages assujettis à la *Loi sur la sécurité des barrages* (L.R.Q., chapitre S-3.1.01), soit ceux répertoriés dans la base de données du CEHQ. De plus, les classes 3 et 4 ont été fusionnées en une seule cote, la cote 3, soit la classe des obstacles considérés difficilement franchissables par l'anguille.

D'autre part, il est à noter que la présence de dispositifs de franchissement (échelles, passes à poissons, ou autres) ne fait pas partie des critères retenus dans l'établissement des cotes de franchissabilité de la présente étude, cette information n'étant pas disponible pour tous les barrages et leur franchissabilité ne pouvant non plus être déterminée à partir des données disponibles dans la base de données du CEHQ. Il s'agit d'une différence par rapport à

5.0 ESTABLISHMENT OF UPSTREAM PASSABILITY RANKS

5.1 DESCRIPTION OF UPSTREAM PASSABILITY RANKS

The criteria used for European eel to assess upstream passability were used to establish the passability grid for the upstream passag of American eel. Nevertheless, when assessing the feasibility of using Steinbach's criteria (2006, 2009), certain of these criteria were modified and their scores adjusted to make them representative of the characteristics of obstacles encountered in the watersheds under study.

On the one hand, class 0 for the eliminated obstacle was excluded from the grid because this study aims solely to assess upstream passability with regard to dams subject to the *Dam Safety Act* (R.S.Q., chapter S-3.1.01), i.e., those listed in the CEHQ database. Furthermore, classes 3 and 4 were merged into a sole rank of 3, i.e., the class of obstacles considered almost impassable for eel.

On the other hand, it should be noted that the presence of passage facilities (ladders, fish passes, or others) is not included in the criteria selected for establishing the passability ranks in this study, since this information is not available for all the dams and their passability cannot be determined using the data available in the CEHQ database. This constitutes a disparity with respect to the European assessment. In fact, the latter includes

l'évaluation européenne. De fait, cette dernière inclut à la grille d'évaluation des obstacles une cote d'équivalence qui prend en compte la présence de dispositifs d'aide au franchissement d'un obstacle. Par ailleurs, bien que le cumul de plusieurs barrages partiellement franchissables puisse être un facteur limitant la colonisation vers l'amont de l'anguille (Legault et Porcher, 1990 cités dans Dagrève 2005), celui-ci n'est pas considéré dans la présente évaluation.

in its obstacle assessment grid an equivalent rank that takes into account the presence of facilities to improve obstacle passability. Furthermore, although the accumulation of several partially passable dams may be a factor limiting upstream colonization by eels (Legault and Porcher, 1990 cited in Dagrève 2005), this is not considered in this assessment.

En résumé, les cotes de franchissabilité amont de la présente étude sont semi-quantitatives, ne tiennent pas compte de la présence ou non de dispositifs de franchissement et comportent quatre niveaux :

- **Cote 1 :** obstacle franchissable sans difficulté apparente (libre circulation assurée à tout niveau de débit);
- **Cote 2 :** obstacle partiellement franchissable (temporairement ou avec une certaine difficulté), mais délais significatifs encourus ou seulement certains stades le franchissent (civelles et petites anguilles);
- **Cote 3 :** obstacle difficilement franchissable pour tous les stades (impact important en conditions moyennes d'hydraulicité; passage possible seulement en conditions exceptionnelles);
- **Cote 4 :** obstacle infranchissable (passage impossible, y compris en conditions exceptionnelles).

To summarize, the upstream passability ranks in this study are semi-quantitative, do not take into account the presence or absence of passability facilities, and contain four levels:

- **Rank 1:** obstacle passable without apparent difficulty (free passage ensured at all flow levels);
- **Rank 2:** obstacle passable at times or with some difficulty, but significant delays encountered or only certain stages surmount it (elvers and young eels);
- **Rank 3:** obstacle nearly impassable for all stages (significant impact in average runoff conditions; passage possible only under exceptional conditions);
- **Rank 4:** obstacle impassable (passage impossible, even under exceptional conditions).

Le site internet du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ 2010) rend accessible une photographie par barrage

The Web site of the Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ 2010) also provides, for each

répertorié dans la base de données à l'étude. Une validation par photo-interprétation a été effectuée sur un sous-échantillon aléatoire de barrages. En plus de servir de moyen de validation pour les critères retenus dans l'analyse de groupement, la photo-interprétation a permis d'évaluer deux critères additionnels d'évaluation de la franchissabilité amont, soit la *Pente* (ratio hauteur/longueur), et l'*Effet berge*, à savoir si la nature des berges offre une pente et/ou un matériau favorable à la reptation des anguilles le long des berges. Ces critères ont été évalués dans la mesure du possible selon la voie de franchissement la plus attractive au droit de l'ouvrage. Il s'agit de deux critères d'évaluation considérés par Steinbach (2006, 2009). La *Diversité*, soit l'existence d'une voie de passage plus facile, était également une variable recherchée, mais malheureusement, les prises de vues ont rarement permis de statuer sur la présence d'une voie possible de contournement de l'obstacle.

of the dams listed, a photograph of the structure. Photographs for a random subsample of dams were used to assess the validity of ranks based on the statistical analyses and to assess additional upstream passability assessment criteria. Two criteria were assessed during the photo-interpretation analysis. These are *Slope* (height/length ratio), and *Bank effect*, that is, whether or not the banks provide a slope and/or a material conducive to eel crawling. These have been assessed as far as possible according to the most attractive path of passage through the structure. These two assessment criteria were considered by Steinbach (2006, 2009). *Diversity*, i.e., the existence of an easier passage way, was also a variable of potential interest, but unfortunately, the photographs seldom allowed a judgment on the presence of a possible path for bypassing the obstacle.

6.0 ÉTABLISSEMENT DE COTES DE FRANCHISSABILITÉ AVAL

6.1 DESCRIPTION DES COTES DE FRANCHISSABILITÉ AVAL

Les critères utilisés chez l'anguille européenne pour l'évaluation de la franchissabilité aval peuvent en partie être mis à contribution pour effectuer un exercice semblable pour l'anguille d'Amérique. C'est le cas de l'influence de la hauteur de chute. Toutefois, la majorité des critères d'évaluation utilisés pour évaluer la franchissabilité aval des anguilles européennes ne sont actuellement pas documentés dans la base de données du CEHQ (e.g., présence et type de turbines, dispositifs de franchissement, présence d'une fosse en aval de l'ouvrage).

Les cotes de franchissabilité aval de la présente étude sont semi-quantitatives, ne tiennent pas compte de la présence ou non de turbines (information non disponible) et comportent quatre niveaux :

- **Cote 1 :** obstacle franchissable sans difficulté apparente (libre circulation assurée à tout niveau de débit);
- **Cote 2 :** obstacle partiellement franchissable, mais délais significatifs encourus;
- **Cote 3 :** obstacle difficilement franchissable, car délais significatifs encourus et mortalités significatives;
- **Cote 4 :** obstacle infranchissable (100% de mortalité).

6.0 ESTABLISHMENT OF DOWNSTREAM PASSABILITY RANKS

6.1 DESCRIPTION OF DOWNSTREAM PASSABILITY RANKS

The criteria used for European eel to assess downstream passability may be applied to American eel, e.g., the impact of waterfall height. However, most of the assessment criteria used to assess downstream passability for European eel are not currently documented in the CEHQ database (e.g., presence of turbines and type, passage facilities, pool with considerable depth downstream of the dams).

The downstream passability ranks in this study are semi-quantitative and do not take into account whether turbines are present (information not available). They comprise four levels:

- **Rank 1:** obstacle passable without apparent difficulty (free passage ensured at all flow levels);
- **Rank 2:** obstacle partially passable, but significant delays encountered;
- **Rank 3:** obstacle almost impassable because of significant delays encountered, and significant mortalities;
- **Rank 4:** impassable obstacle (100% mortality).

7.0 RÉSULTATS ET DISCUSSION

7.1 RÉPARTITION DES BARRAGES ET CARACTÉRISTIQUES

Le nombre d'obstacles répertoriés dans la base de données du CEHQ, en date du 27 janvier 2010, s'élève à 5,443 barrages. La figure 1 illustre la totalité des barrages à l'étude. De ces 5,443 barrages, 4,994 se situent dans le bassin versant du Saint-Laurent. Deux autres bassins versants sont touchés. Il s'agit de celui de la baie d'Hudson (n = 312 barrages) et de celui de la rivière Saint-Jean qui coule vers la baie de Fundy (n = 137 barrages). Près de la moitié des ouvrages sont en terre, soit à 46,2 %, l'autre groupe dominant étant les ouvrages en béton (34,4 %). Près de la moitié (46,8 %) des obstacles sont de moins de 3 m de hauteur; 19,3 % ont une hauteur comprise entre 3 et 4 m, 11,2 % entre 4 et 5 m, 7,0 % entre 5 et 6 m, et 15,7 % sont de plus de 6 m de hauteur. Les barrages sont majoritairement utilisés pour des fins récréatives et de villégiature (51,3 %), mais ils le sont également pour l'approvisionnement en eau (18,4 %), et pour l'hydroélectricité (13,8 %). Les barrages hydroélectriques sont les plus hauts, soit en moyenne environ 15 m de hauteur. Les barrages en enrochement imperméable comprennent une majorité de grands ouvrages, avec une hauteur moyenne de 24,7 m. Toutefois, la hauteur de barrage est très variable selon les types de matériaux et l'utilisation, et ce, principalement pour les barrages de plus de 6 m.

7.0 RESULTS AND DISCUSSION

7.1 DAM DISTRIBUTION AND CHARACTERISTICS

The number of obstacles listed in the CEHQ database (as of 27 January 2010), was 5,443 dams. Figure 1 illustrates all of the dams studied. Of the 5,443 dams, 4,994 are located in the St. Lawrence watershed. Two other watersheds are involved. The Hudson Bay watershed (n = 312 dams) and the watershed of the Rivière Saint-Jean, which flows to the Bay of Fundy (n = 137 dams). Nearly half (46.2%) of the structures are made of earthfill with the other dominant group being concrete structures (34.4%). Nearly half (46.8%) of the obstacles are less than 3 m in height; 19.3% are between 3 and 4 m, 11.2% between 4 and 5 m, 7.0% between 5 and 6 m, and 15.7% are over 6 m. The dams are mainly used for the purposes of recreation and vacational facilities (51.3%), but also for supplying water (18.4%), and hydroelectricity (13.8%). The hydroelectric dams are the highest, i.e., about 15 m in height on average. Impervious rockfill dams account for most of the large structures, with an average height of 24.7 m. However, the dam height varies considerably depending on the types of material and the use, mainly for dams over 6 m.

Le tableau 6 et la figure 2 montrent une ventilation des barrages selon leur hauteur, les matériaux utilisés et l'utilisation du barrage. Les ouvrages en béton, en caissons et contreforts de bois, en déversoir libre en béton, et en enrochement servent principalement à l'usage récréatif (26 à 47 %) et à celui d'approvisionnement en eau (24 à 44 %). Les barrages en déversoir libre en enrochement servent pour un usage récréatif (48 %) et pour la faune (29 %). Quant aux ouvrages en enrochement imperméable, ils servent principalement à un usage hydroélectrique (54 %), mais également récréatif (26 %). Les ouvrages en palplanches sont utiles à l'hydroélectricité (48 %) et à la faune (39 %). Enfin, les ouvrages en terre sont principalement d'usage récréatif (61 %).

Table 6 and Figure 2 show a breakdown of dams based on their characteristics, i.e., height, materials used for construction, and purpose of the dam. Structures made of concrete, timber cribs and buttresses, concrete and rockfill free weirs are mainly used for recreational purposes (26 to 47%) and for supplying water (24 to 44%). Rockfill—free weir—type dams are used for recreation (48%) and wildlife (29%). Impervious rockfill structures, are mainly used for hydroelectricity (54%), but also for recreational (26%) purposes. Sheet pile structures are useful for hydroelectricity (48%) and wildlife (39%). Finally, earthfilled structures mainly have recreational uses (61%).

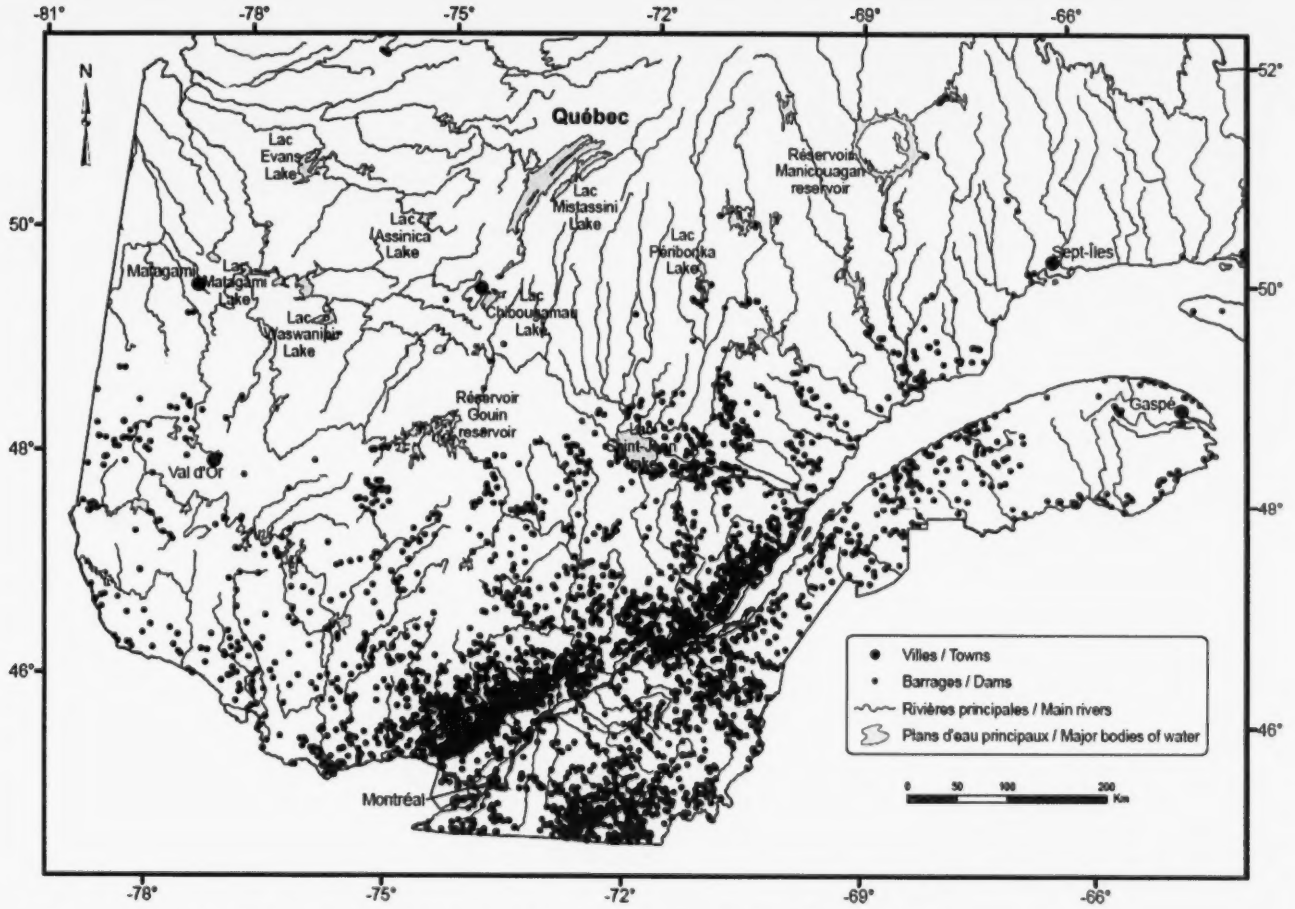


Figure 1. Barrages répertoriés dans la base de données du Centre d'expertise hydrique (CEHQ).
Figure 1. Dams listed in the Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) database.

Tableau 6. Distribution des barrages selon leurs caractéristiques en termes de hauteur, de matériaux, et d'utilisation.

Table 6. Dam distribution according to their characteristics in terms of height, materials, and uses.

Variable	Description des classes / Class description	Proportion des barrages / Proportion of dams (%)
Hauteur / Height	< 3 m	46.8
	3 – 4 m	19.3
	4 – 5 m	11.2
	5 – 6 m	7.0
	> 6 m	15.7
Matériaux / Materials	Terre / Earthfill	46.2
	Béton / Concrete	34.4
	Caissons / Timber crib	7.0
	Déversoir enrochement / Rockfill free weir	3.7
	Enrochement / Rockfill	3.5
	Contreforts bois / Wood buttresses	2.9
	Enrochement imperméable / Impervious rockfill	1.1
	Déversoir béton / Concrete free weir	0.6
	Palplanches / Sheet pile	0.4
Utilisation / Use	Récréatif et villégiature / Recreational	51.3
	Approvisionnement en eau / Supplying water	18.4
	Hydroélectricité / Hydroelectricity	13.8
	Faune / Wildlife	6.7
	Contrôle des inondations / Flood protection	1.1
	Autres / Others	8.7

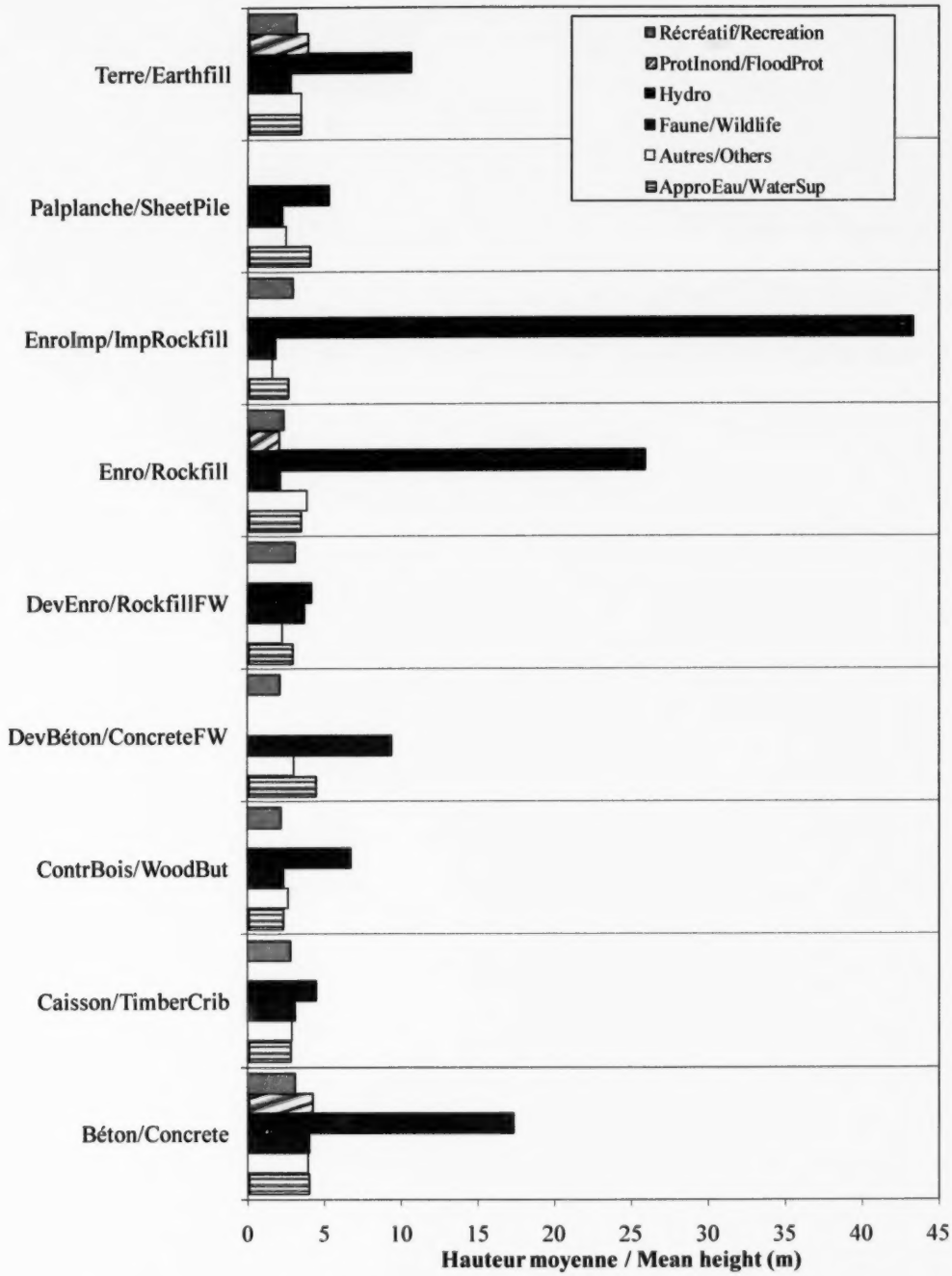


Figure 2. Hauteur moyenne des barrages selon le type de matériaux et d'utilisation. EnroImp, enrochement imperméable; Enro, enrochement; DevEnro, déversoir en enrochement; DevBéton, déversoir en béton; ContrBois, contreforts en bois.

Figure 2. Mean dam height according to material type and dam use. ImpRockfill, Impervious rockfill; RockfillFW, Rockfill free weir; ConcreteFW, Concrete free weir; WoodBut, Wood buttresses.

7.2 RELATIONS ENTRE LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BARRAGES

L'ACP indique que la variabilité des descripteurs quantitatifs peut être décrite par deux types de variables associées en plus forte proportion à l'axe 1 et en moindre partie à l'axe 2 (Figure 3). Le premier axe ou vecteur explique 44 % de la variance, alors que le deuxième axe en explique 34,5 % (Figure 3 et Annexe A). Les résultats finaux sont présentés seulement pour les deux premiers axes (Annexe A). Les variables hauteur de barrage, hauteur de retenue et longueur du barrage sont fortement corrélées à l'axe 1, alors que le débit calculé et la capacité de retenue sont fortement corrélés à l'axe 2.

Ces résultats indiquent que les barrages sont caractérisés soit par leur importance physique (variables rattachées à l'axe 1) soit par l'hydrologie (variables rattachées à l'axe 2). La première composante peut être interprétée comme décrivant l'importance de l'obstacle pour le poisson (hauteur du barrage, hauteur de retenue, longueur) et la seconde l'importance du secteur amont pour le poisson (débit calculé et capacité de retenue). Ces variables étant corrélées positivement à l'axe 1 et à l'axe 2, un obstacle de grandes dimensions qui pose un défi de franchissabilité, drainera aussi une superficie non négligeable d'habitats et il est fort probable qu'il attire une plus grande quantité d'anguilles en migration qu'un obstacle de petites dimensions.

7.2 RELATIONSHIPS AMONG THE PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE DAMS

The PCA indicates that the variability of quantitative descriptors can be demonstrated by two types of variables more strongly associated with axis 1 and less so with axis 2 (Figure 3). The first vector of the PCA accounts for 44.0% of the variance, whereas the second axis accounts for 34.5% of the variance (Figure 3). The final results are only presented for the first two axes (Appendix A). The variables dam height, dam length, and dam storage depth are strongly correlated on axis 1 whereas the calculated flow and impounding capacity are strongly correlated on axis 2.

These results indicate that the dams are characterized either by their physical size (variables associated with axis 1) or by hydrology (variables associated with axis 2). The first component may be interpreted as describing the challenge of the obstacle to fish (dam storage depth, height, length) and the second, the importance of the upstream area for fish (calculated flow and impounding capacity). Since these variables are positively correlated with axis 1 and axis 2, an obstacle of large dimensions that poses a challenge for passability will also drain a significant habitat area. Thus it is quite probable that it attracts a larger quantity of migrating eels than an obstacle of smaller dimensions.

Considérant les résultats de l'ACP et la disponibilité des données dans la base du CEHQ, la hauteur de barrage (composante «importance de la taille de l'obstacle») et la capacité de retenue (composante «attrait de l'obstacle») ont été utilisées dans les analyses de groupements subséquentes.

Given the results of the PCA and the availability of data in the CEHQ database, dam height ("obstacle size" component) and impounding capacity ("obstacle attraction" component) were retained and used for subsequent cluster analyses.

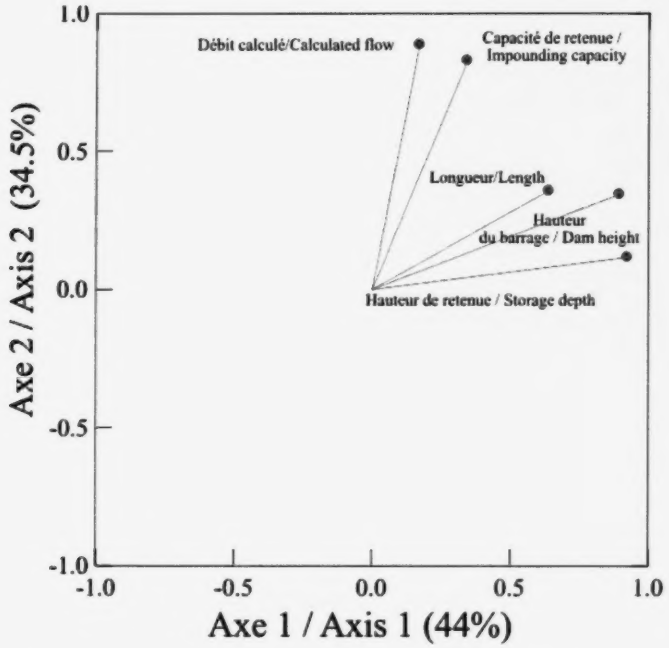


Figure 3. Analyse en composante principale (ACP) sur les variables quantitatives (continues).
Figure 3. Principal component analysis (PCA) on numerical values.

7.3 Classification des barrages selon leurs caractéristiques physiques

Une première analyse de groupement des barrages a été effectuée avec les variables hauteur du barrage, capacité de retenue et les variables binaires créées pour les types de matériaux et les types d'utilisation. Des graphiques de validité et des essais de différents scénarios de groupements ont suggéré de 3 à 9 groupements. Une distance d'environ 0,65 (Figure 4a) a été retenue lors de la formation de sept groupements distincts (Tableau 7), dont un groupe qui inclut la majorité des barrages (Figures 4a et b). En retenant sept groupes, cela permettait réellement d'isoler les barrages présentant des caractéristiques particulières comme pour les groupements G1, G4 et G7, et de faire ressortir le groupement G2, ce qui n'était pas possible avec un nombre moindre de groupements.

Le groupe 3 contient le plus de barrages. Ceux-ci sont caractérisés par une utilisation diverse, mais sont dominés par les activités récréatives et l'approvisionnement en eau (Figure 5a). Les matériaux sont aussi diversifiés mais le groupe 3 est surtout caractérisé par des barrages de béton et de terre (Figure 5b). Les barrages de ce groupe sont de faible hauteur (hauteur moyenne de 3,08 m) et possèdent une capacité de retenue moyenne (Tableau 7). La hauteur s'étend toutefois entre 0,7 m et 13,0 m. Le groupe 5 est le seul autre groupe avec un grand nombre de barrages. Il est caractérisé par une utilisation surtout hydroélectrique et des barrages de terre, de béton ou en enrochement (Figures 5a et b). Les barrages de ce groupe sont plus imposants que pour le groupe 3 avec une hauteur moyenne de 9,73 m. Les hauteurs varient cependant entre 2,0 et 53,0 m. La capacité de retenue est un peu plus forte que pour les barrages du groupe 3 et un peu plus faible que pour les barrages des autres groupes, sauf le groupe 4 (Tableau 7). Le groupe 7 est composé de barrages dont la hauteur et la

7.3 Dam Classification based on their physical characteristics

An initial cluster analysis of dams was conducted using the variables dam height, impounding capacity, and the binary values created for the types of material and types of use. Validity graphs and tests of various cluster scenarios suggested 3 to 9 clusters. A distance of approximately 0.65 (Figure 4a) was retained that resulted in seven groups (Table 7), including one group that included most of the dams (Figures 4a and b). Selecting seven clusters made it possible to isolate the dams that presented particular characteristics such as for clusters G1, G4, and G7, and made it possible to reveal group G2, which was not apparent at a lower level of similarity.

Group 3 contained the most dams. These are characterized by various uses, but the main uses are for recreational activities and water supply (Figure 5a). The materials are also varied, but group 3 is above all characterized by concrete and earthfill dams (Figure 5b). The dams in this group are low in height (average height of 3.08 m) and have average impounding capacity (Table 7). However, the height ranges from 0.7 m to 13.0 m. Group 5 is the only other group with a large number of dams. It is characterized by mainly hydroelectric use and concrete, earthfill, or rockfill dams (Figures 5a and b). The dams in this group, with an average height of 9.73 m, are larger than those in group 3, although heights vary between 2.0 and 53.0 m. The impounding capacity is somewhat greater than for the dams of group 3 and somewhat lower than for dams in the other groups, except for group 4 (Table 7). Group 7 is composed of dams having significant height and impounding capacity (average height: 184.50 m). Note that the

capacité de retenue sont très élevées (hauteur moyenne de 184,50 m). Notons que le type de matériaux diffère au sein d'un même groupe (sauf pour les groupes 1 et 4), l'utilisation est strictement hydroélectrique pour les groupes 1, 2, 4, 6 et 7 (Figure 5a).

types of material differ within groups (except for groups 1 and 4), and that the use is strictly hydroelectric for groups 1, 2, 4, 6, and 7 (Figure 5a).

Le groupe 2 possède les plus petits barrages pour la hauteur et une capacité de retenue moyenne. Le type d'utilisation est strictement hydroélectrique et les types de matériaux sont diversifiés. Le groupe 1 est caractérisé par les barrages ayant la plus forte capacité de retenue, mais avec de très faibles hauteurs. Notons que le groupe 4 est formé d'un seul barrage qui est caractérisé par une hauteur de 28,2 m et une capacité de retenue de seulement 6,000 m³, ce qui suggère que certaines données sont erronées.

Group 2 has the smallest dams in terms of height and average impounding capacity. The type of use is strictly hydroelectric and the types of material are varied. Group 1 is characterized by dams with the greatest impounding capacity but with very limited heights. Note that group 4 is composed of a single dam with a height of 28.2 m and an impounding capacity of only 6,000 m³, which suggests that some data are invalid.

Bien que l'analyse de groupement permette de bien décrire la nature du problème auquel les gestionnaires sont confrontés, la grande variabilité des caractéristiques, en particulier de la hauteur, au sein d'un même groupe, complique l'attribution d'une cote de franchissabilité amont à un barrage selon son appartenance à un des sept groupes de barrages. De fait, deux des sept groupes formés (groupes 3 et 5) contiennent à eux seuls la quasi-totalité des barrages, soit 5,304 sur un total de 5,443 barrages. Il est donc préférable de prendre une autre approche pour l'évaluation de la franchissabilité amont. La première composante de l'ACP (axe 1) pourrait être utilisée à cette fin, mais les données étant souvent incomplètes, il n'est pas possible de calculer une valeur de l'axe 1 pour chacun des barrages. La hauteur du barrage, une variable représentative de l'importance des obstacles, tel que démontré par l'ACP, est par contre une donnée toujours disponible dans la base de données du CEHQ.

Although the cluster analysis makes it possible to describe the nature of the problem facing managers, the extensive variability of characteristics within groups, particularly for height, complicates assigning an upstream passability rank for a dam based on belonging to one of the seven dam groups. In fact, two of the seven groups (groups 3 and 5) alone contain nearly all of the dams—5,304 of a total of 5,443 dams. For this reason, it is preferable to adopt another approach to assess upstream passability. The first component of the PCA (axis 1) could be used for this purpose, but since the data are often incomplete, it is not possible to calculate a value for axis 1 for each dam. On the other hand, dam height—a variable representing obstacle size, as demonstrated by the PCA—is always available in the CEHQ database.

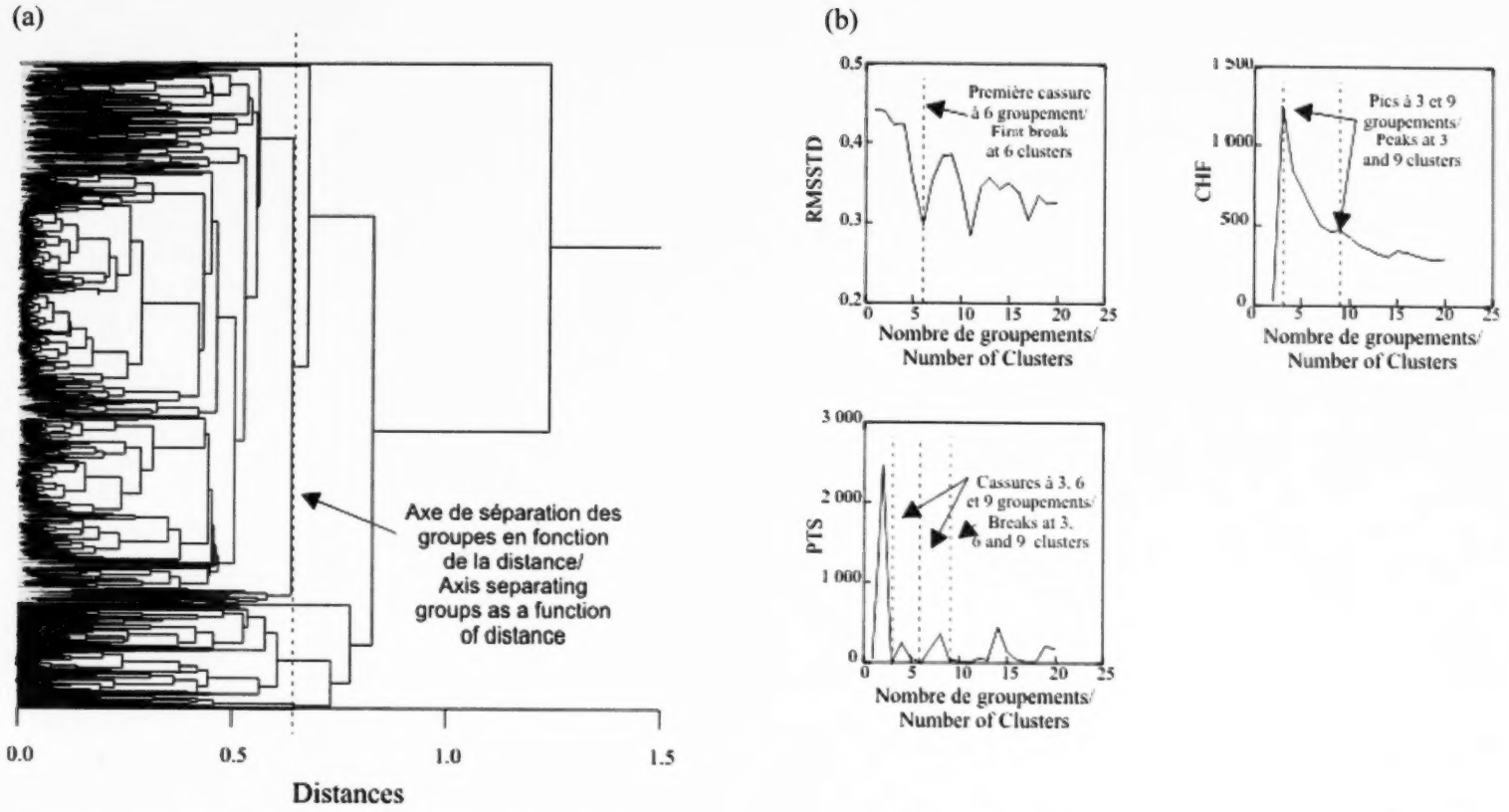


Figure 4. (a) Analyse de groupement hiérarchique des barrages portant sur 15 variables binaires et 2 variables continues et (b) Indice de validation du nombre de groupements obtenus selon trois critères. Indices: Root-mean-square standard deviation (RMSSTD); Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS).

Figure 4. (a) Hierarchical cluster analysis of dams on 15 binary variables and 2 numerical variables and (b) Validation index of numbers of clusters according to three criteria. Indices: Root-mean-square standard deviation (RMSSTD); Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS).

Tableau 7. Statistiques descriptives pour chacun des groupes de barrages obtenus par l'analyse de groupement hiérarchique effectuée avec toutes les variables catégoriques et les variables continues (hauteur de barrage et capacité de retenue).

Table 7. Descriptive statistics for each group of dams according to the cluster analysis conducted on categorical and numerical variables (dam height, impounding capacity).

	Hauteur / Dam Height							Capacité de retenue / Impounding capacity						
	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
Nbre / Nb	4	23	4,560	1	744	109	2	4	23	4,560	1	744	109	2
Moyenne / Mean	*3.50*	1.77	3.08	*28.20*	9.73	43.12	*184.50*	*4.84E+13*	5.19E+08	7.05E+05	*6.00E+03*	1.50E+09	7.12E+09	*8.07E+10*
Écart-type / Standard deviation	*1.00*	1.02	1.54	-	6.60	26.59	*41.72*	*2.66E+13*	1.64E+09	4.54E+06	-	2.42E+09	1.89E+10	*8.64E+10*
Minimum	*3.00*	0.60	0.70	-	2.00	9.00	*155.00*	*8.49E+12*	0.00E+00	0.00E+00	-	0.00E+00	2.50E+07	*1.96E+10*
Maximum	*5.00*	3.60	13.00	-	53.00	168.20	*214.00*	*6.17E+13*	6.00E+09	1.42E+08	-	1.39E+10	1.42E+11	*1.42E+11*

Note : les chiffres indiqués en *italique* pourraient être des valeurs erronées dans la base de données. / numbers in *italics* could represent erroneous data from database

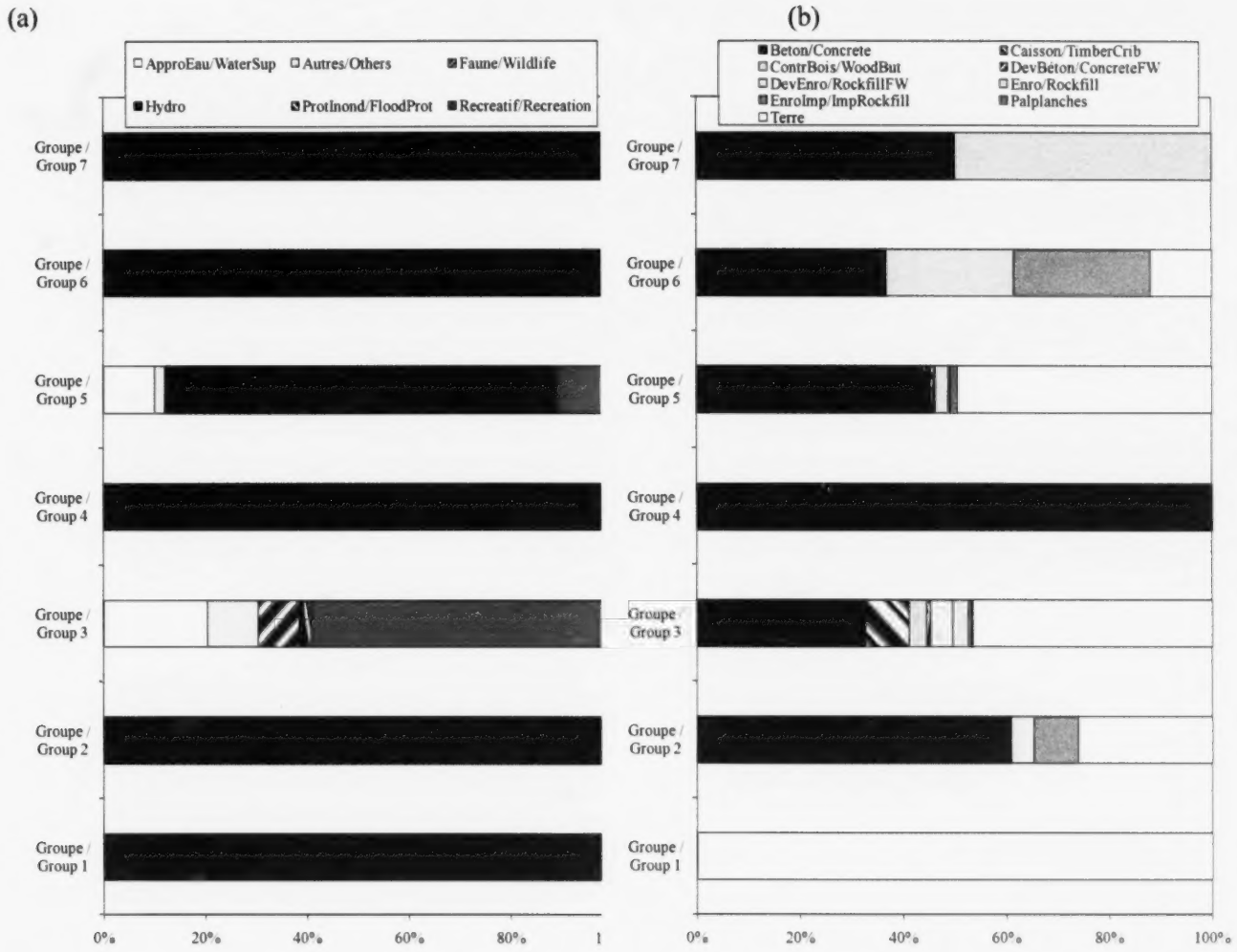


Figure 5. (a) Répartition de l'utilisation des barrages et (b) du type de matériaux en fonction des groupements obtenus par l'analyse de groupement hiérarchique.

Figure 5. (a) Distribution of dam use and (b) material type as a function of groups established by the hierachical cluster analysis.

Toutefois, les groupes obtenus par l'analyse de groupement hiérarchique pourraient être utilisés dans l'évaluation de la franchissabilité vers l'aval. En effet, la franchissabilité aval est surtout liée au type d'utilisation des barrages. De fait, bien que les barrages élevés engendrent des mortalités chez les poissons en dévalaison, les barrages d'usage hydroélectrique sont les seuls pouvant engendrer un facteur de mortalité supplémentaire en raison de la présence de turbines.

In contrast, the groups obtained from hierarchical cluster analysis could be used in the assessment of downstream passability. Downstream passability is particularly linked to the type of dam use. In fact, even if elevated dams generate downstream fish mortalities, dams used for hydroelectricity production are the only ones that generate an additional mortality factor during downstream passage due to the presence of turbines.

7.4 Description des deux critères retenus pour l'évaluation de la franchissabilité amont

7.4 Description of the two criteria selected for the assessment of upstream passability

À la lumière des résultats des analyses de groupements et conformément à la revue de littérature, deux variables de la base de données ont été retenues pour établir une cote de franchissabilité amont, soit la hauteur du barrage et le type de matériaux. Il s'agit de deux variables pour lesquelles les données sont connues pour chacun des barrages. Ces deux variables correspondent dans une certaine mesure à deux des cinq critères d'évaluation considérés dans la grille de notation de Steinbach (2006, 2009), soit respectivement la hauteur de chute et la rugosité (Tableau 8).

In light of the results from the cluster analyses and in accordance with the literature review, two variables of the database were selected to establish an upstream passability rank, i.e., dam height and material type. The data for these two variables are available for all dams. To a certain extent, these two variables correspond to two of the five assessment criteria in Steinbach's scoring key (2006, 2009), i.e., waterfall height and surface roughness (Table 8).

Ces deux variables ont été regroupées préalablement en quatre catégories chacune, chaque catégorie correspondant à un rang du moins élevé au plus élevé (hauteur du barrage) et du plus perméable au plus étanche (type de matériaux).

The two variables were first grouped into four categories, each category corresponding to a rank from lowest to highest (dam height) and from most permeable to most impervious (type of material).

Tableau 8. Critères d'évaluation suggérés pour l'analyse par groupement selon des classes de franchissabilité des obstacles à la montaison de l'anguille (modifié de Steinbach 2006).

Table 8. Suggested assessment criteria for the cluster analysis according to upstream passability classes (modified from Steinbach 2006).

Critère d'évaluation / Assessment criterion	Description du critère / Criterion description
Hauteur de barrage / Dam height (m)	< 1.0 m 1.0 m – 2.0 m 2.0 m – 3.0 m > 3.0 m
Type de matériaux / Material type	**Parement aval très rugueux et perméable** (déversoir libre en enrochement; enrochement) / **Downstream face very rough and permeable** (free weir rockfill dam; rockfill dam) **Parement aval rugueux, végétalisé et semi-étanche** (caissons de bois remplis de terre et de pierres; contreforts de bois (caissons et chandelles) / **Downstream face rough, vegetated and semi-permeable** (timber cribs [earthfill, rockfill]; wood buttresses) **Parement aval lisse déversant ou semi-étanche** (déversoir libre en carapace de béton; écran de palplanches en acier remplis de terre; palplanches en acier) / **Downstream face smooth with spillway or semi-impervious** (Free weir concrete, sheet pile skin plate, steel sheet pile) **Matériaux étanches** (enrochement zoné noyau; écran de béton en amont d'une digue de terre; contreforts de béton; béton-gravité; béton-gravité remblayé (terre ou pierres); béton-voûte; enrochement (masque amont de terre); enrochement zoné écran d'étanchéité; enrochement (masque amont de béton); terre / **Impervious materials** (rockfill core, concrete skin plate, concrete buttresses, concrete-gravity, filled concrete-gravity, arch (vault) dam, rockfill with earthfill flow retarding facing, rockfill skin plate, rockfill with concrete flow retarding facing, earthfill)
Cote de franchissabilité / Passability rank	**Appréciation du franchissement amont / Assessment of upstream passability**
1	Franchissable (sans difficulté apparente) / Passable without apparent difficulty
2	Franchissable partiellement ou avec une certaine difficulté / Passable at times or with some difficulty
3	Difficilement franchissable / Nearly impassable
4	Infranchissable / Impassable

7.4.1 Classes de hauteur de barrage

Puisque la hauteur de chute n'était pas disponible pour l'ensemble des barrages répertoriés dans la base du CEHQ, nous avons dû utiliser la hauteur du barrage pour assigner une valeur de franchissabilité. Comme il y a une différence entre la hauteur de barrage et la hauteur de chute, et que les cotes attribuées par Steinbach s'appliquent plutôt à des catégories de hauteur de chute, une correspondance a dû être établie entre les classes de hauteur de chute et leurs cotes respectives, telles que définies par Steinbach. Le tableau 9 décrit ces catégories et leur assigne une cote de franchissabilité amont (cotes 1 à 4, décrites à la section 6.1). La hauteur du barrage est toujours plus élevée que la hauteur de retenue[1]. Le tableau 9 montre la correspondance entre la hauteur de retenue et la hauteur du barrage pour chacune des catégories de hauteur définies. Les différences entre les deux variables sont de moins de 0,5 m pour les hauteurs de barrage inférieures à 2 m et d'un peu plus de 0,6 m pour les hauteurs de barrage comprises entre 2 et 3 m (tableau 9). Ces différences ont justifié les intervalles considérés pour la hauteur de barrage. Ainsi, une cote 4 a été attribuée aux barrages de hauteur supérieure à 3 m.

7.4.1 Classes of dam height

Since waterfall height was not available for all the dams listed in the CEHQ database, we had to use the dam height to assign a passability value. Since there is a difference between dam height and waterfall height, and the ranks assigned by Steinbach apply to waterfall height categories, a correspondence had to be determined between the classes of waterfall height and their respective ranks, as defined by Steinbach. Table 9 describes these categories and assigns them an upstream passability rank (ranks 1 to 4, described in section 6.1). Dam height is always greater than dam storage depth[2]. Table 9 shows the correspondence between storage depth and dam height for each of the defined height categories. The differences between the two variables are less than 0.5 m for dam heights under 2 m and a little over 0.6 m for dam heights between 2 and 3 m (Table 9). These differences justified the intervals considered for dam height. Thus a rank 4 was assigned to dams with height exceeding 3 m.

---

1 Dans la base de données du CEHQ, la hauteur de retenue est répertoriée au lieu de la hauteur de chute. Il s'agit de la distance verticale entre le point le plus bas du terrain naturel au pied aval du barrage et le niveau maximal d'exploitation.

2 In the CEHQ database, the dam storage depth is listed rather than the waterfall height. This is the vertical distance between the lowest point of the natural soil at the downstream toe of the dam and the maximum operating level.

Tableau 9. Cote de franchissabilité selon les classes de hauteur de barrages et correspondance entre la hauteur de retenue et la hauteur des barrages répertoriés dans la base de données du CEHQ.

Table 9. Passability rank according to dam height classes and correspondence between dam storage depth and dam height for dams listed in the CEHQ database.

Critère d'évaluation / Assessment criterion	Classe de hauteur de barrage / Dam height class (m)	Hauteur moyenne / Mean height (m)		Différence entre hauteur de barrage et hauteur de retenue / Difference between dam height and storage depth (m)	Cote /Rank
		Hauteur de barrage / Dam height (m)	Hauteur de retenue / Storage depth (m)		
Hauteur de barrage / Dam height	< 1 m	0.90	0.80	+ 0.10	1
	≥ 1 m & < 2 m	1.51	1.09	+ 0.42	2
	≥ 2 m & < 3 m	2.40	1.73	+ 0.67	3
	≥ 3 m	7.36	4.80	+ 2.56	4

Cote de franchissabilité / Passability rank	Appréciation du franchissement amont / Assessment of upstream passability
1	Franchissable (sans difficulté apparente) / Passable without apparent difficulty
2	Franchissable partiellement ou avec une certaine difficulté / Passable at times or with some difficulty
3	Difficilement franchissable / Nearly impassable
4	Infranchissable / Impassable

7.4.2 Classes de types de matériaux

La base de données du CEHQ répertorie 20 types de matériaux dont la majorité est en terre (46 %) ou en béton (34 %). La section 4.2 traite de chacun des types de matériaux, de leur répartition dans la base de données, de même que des regroupements effectués pour évaluer leur possibilité de franchissement par l'anguille (Tableau 5).

Afin de bien identifier les classes de matériaux à considérer et de leur attribuer une cote de franchissabilité, les barrages n'offrant que des matériaux étanches ont été considérés comme ceux ayant le plus grand impact sur la montaison; alors que les barrages aux parements avals rugueux, végétalisés, semi-étanches ou déversants ont été classifiés comme étant les plus

7.4.2 Classes of material types

The CEHQ database identifies 20 types of materials, the most commonly used of which are earthfill (46%) and concrete (34%). Section 4.2 covers each of the types, their distribution in the database, and the groupings assigned to assess their passability for eel (Table 5).

In order to identify the classes of material to consider and assign a passability rank, the dams made of only impervious materials were considered as those having the greatest impact on upstream passage; those with downstream faces that are rough, covered in vegetation, semi-impervious or have spillways were

favorables à la franchissabilité amont de l'anguille. Le tableau 10 présente les cotes de franchissabilité pour les classes des types de matériaux selon les regroupements effectués.

Les barrages avec un déversoir libre en enrochement et ceux en enrochement sont considérés comme les plus propices au franchissement par l'anguille puisqu'ils sont de faible pente et sont perméables (cote 1). Toutefois, les barrages en enrochement couplés avec un dispositif d'étanchéité (noyau, masque amont; écran) supplémentaire (enrochement imperméabilisé) ne se retrouvent pas sous la cote 1 puisqu'ils présentent une étanchéité conçue pour résister aux forces hydrauliques. Ces derniers se retrouvent plutôt dans le groupe des ouvrages en béton.

Une cote 4 (obstacle infranchissable) a été attribuée à tous les types de barrages présentant du béton, à l'exception du déversoir libre en carapace de béton. Celui-ci est de nature déversante à surface arrondie, et présente une pente plus faible aidant au franchissement. De plus, cette surface peut être recouverte de mousses, substrat favorisant la reptation par l'anguille. Ces déversoirs en carapace de béton montrent néanmoins dans la majorité des cas une lame d'eau caractérisée par une vitesse assez élevée (D. Morissette, AECOM Tecsult, comm. pers., 21 janvier 2010). Puisque les ruptures de pente et les écoulements à vitesse excessive nuisent à la montaison des anguilles (Porcher 1992), les déversoirs en béton sont classés difficilement franchissables (cote 3; Tableau 10). On retrouve également sous la cote 3 les ouvrages composés de matériaux de palplanches. Ces structures sont souvent imposantes, mais elles ne

classed as the most favourable to upstream passability for eel. Table 10 presents the passability ranks for the classes of material types based on the cluster analysis.

Dams with a rockfill free weir and rockfill dams are considered the most conducive to passability for eel because they have a low slope and are permeable (rank 1). However, rockfill dams combined with an additional impervious structure (core, flow-retarding facing; skin plate) are not ranked 1, because they present imperviousness designed to resist water power. These types of dams are rather grouped with those having concrete structures.

Rank 4 (impassable obstacle) was assigned to all types of concrete dams, except for the free weir-concrete shield. The latter has a rounded surface (which spills) and has a lower slope facilitating passability. Furthermore, this surface can be covered in moss, a substrate that is conducive to crawling for eels. These concrete shield weirs nevertheless present a sheet of water characterized by relatively high velocity (D. Morissette, AECOM Tecsult, pers. comm., 21 January 2010). Because changes in gradient and excessive flow velocities interfere with upstream eel passage (Porcher 1992), concrete weirs are classed as almost impassable (rank 3; Table 10). Rank 3 also includes structures with sheet piles. These structures are often imposing but they are not entirely impervious.

sont pas complètement étanches.

Tableau 10. Cote de franchissabilité établie pour les types de matériaux utilisés dans la construction des barrages répertoriés dans la base de données du CEHQ.
Table 10. Passability rank established for types of material used in dams listed in the CEHQ database.

Critère d'évaluation / Assessment criterion	Description du critère / Criterion description	Cote/Rank
Type de matériaux / Material type	**Parement aval très rugueux et perméable :** déversoir libre en enrochement, enrochement / **Downstream face very rough and permeable** (free weir rockfill dam; rockfill dam)	1
	Parement aval rugueux, végétalisé et semi-étanche : caissons de bois remplis de terre et de pierres, contreforts de bois (caissons et chandelles) / **Downstream face rough, vegetated and semi-permeable** (timber cribs [earthfill, rockfill]; buttresses)	2
	Parement aval lisse déversant ou semi-étanche : déversoir libre en carapace de béton, écran de palplanches en acier remplis de terre, palplanches en acier / **Downstream face smooth with spillway or semi-impervious** (free weir concrete, sheet pile skin plate, steel sheet pile)	3
	Matériaux étanches : enrochement zoné noyau, écran de béton en amont d'une digue de terre, contreforts de béton, béton-gravité, béton-gravité remblayé (terre ou pierres), béton-voûte, enrochement (masque amont de terre), enrochement zoné écran d'étanchéité, enrochement (masque amont de béton), terre / **Impervious materials** (rockfill core, concrete skin plate, concrete buttresses, concrete-gravity, filled concrete-gravity, arch (vault) dam, rockfill earthfill flow retarding facing, rockfill skin plate, rockfill concrete flow retarding facing, earthfill)	4
Cote de franchissabilité / Passability rank	**Appréciation du franchissement amont / Assessment of upstream passability**	
1	Franchissable (sans difficulté apparente) / Passable without apparent difficulty	
2	Franchissable partiellement ou avec une certaine difficulté/ Passable at times or with some difficulty	
3	Difficilement franchissable / Nearly impassable	
4	Infranchissable / Impassable	

Quant aux caissons et aux contreforts de bois, il s'agit de structures semi-étanches, qui peuvent se végétaliser rapidement. Néanmoins, puisque les ouvrages peuvent présenter un certain dénivelé dans le cours d'eau dépendant de la conception, ceux-ci sont considérés partiellement franchissables (cote 2; Tableau 10). Enfin, bien qu'ils puissent être végétalisés, les barrages en terre ont été classifiés sous la cote 4 puisqu'ils sont

Timber cribs and buttresses are semi-impervious structures that can be quickly colonized by vegetation. However, since the structures can present a difference in elevation in the watercourse, depending on design, they may be considered partially passable (rank 2; Table 10). Finally, although earthfill dams may be colonized by vegetation, they have been classified under rank 4, because

nécessairement étanches. Rappelons que l'anguille a le pouvoir de progresser par reptation uniquement en présence de substrat humidifié (Larinier et Travade 1998).

7.4.3 Description des groupes de barrages selon les deux critères retenus pour la franchissabilité amont

Les barrages ont ensuite été soumis à une analyse de groupement hiérarchique basée sur ces deux critères, soit les classes de hauteur (Tableau 9) et les classes de matériaux (Tableau 10). Ainsi, en regard à la franchissabilité amont de l'anguille, six groupes ont été formés (Figures 6 et 7) :

- **Groupe 1 (n = 474) :** barrages de hauteurs assez faibles (0,8 - 2,95 m) et faits de matériaux franchissables ou partiellement franchissables;
- **Groupe 2 (n = 274) :** barrages de hauteurs très variables et généralement élevées (2 à 155 m), faits de matériaux franchissables. De ce nombre, 93 (34 %) ont une hauteur inférieure à 3 m;
- **Groupe 3 (n = 217) :** barrages de hauteurs variables mais relativement peu élevées (3 à 15,2 m), faits de matériaux partiellement franchissables ou difficilement franchissables;
- **Groupe 4 (n = 3,640) :** barrages de hauteurs très variables et généralement élevées (2 à 214 m), faits de matériaux infranchissables. De ce nombre, 1,142 (31 %) ont une hauteur inférieure à 3 m;
- **Groupe 5 (n = 26) :** barrages de hauteurs assez faibles (1,0 -

they are necessarily impervious. It should be remembered that eels can only advance by crawling on a wet substrate (Larinier and Travade 1998).

7.4.3 Description of dam groups based on the two criteria selected for upstream passability

The dams were then subjected to a hierarchical cluster analysis based on these two criteria, i.e., the height classes (Table 9) and the material classes (Table 10). Thus with regard to upstream passability for eel, six groups were formed (Figures 6 and 7):

- **Group 1 (n = 474):** dams of low height (0.8–2.95 m), and made of passable or partially passable material;
- **Group 2 (n = 274):** dams of highly variable height and generally high (2 to 155 m), made of passable material. Of these, 93 (34%) have a height of less than 3 m;
- **Group 3 (n = 217):** dams of relatively low height; height variable (3 to 15.2 m), and dams made of partially passable or almost impassable material;
- **Group 4 (n = 3,640):** dams of highly variable height and generally high (2 to 214 m), made of impervious material. Of these, 1,142 (31%) are less than 3 m in height;
- **Group 5 (n = 26):** dams of rather low height (1.0–2.8 m), and made of material that is almost

2,8 m) et faits de matériaux difficilement franchissables;

- **Groupe 6 (n = 812) :** barrages de hauteurs assez faibles (0,6 - 1,98 m) et faits de matériaux infranchissables.

Ces six groupes ont été retenus en fonction des indices de validation et de divers essais de groupements. En associant les cotes de franchissabilité amont établies pour les classes de hauteur de barrage et pour les types de matériaux (Tableaux 8 à 10) aux six groupes de barrages obtenus par l'analyse, une cote globale de franchissabilité amont a été déterminée.

La cote finale de franchissabilité a été établie en fonction de la cote la plus sévère. Ainsi, la cote finale inscrite à la base de données pour la franchissabilité amont est la cote la plus élevée des deux critères d'évaluation considérés, soit entre la cote de franchissabilité pour la hauteur de barrage et celle du type de matériaux. Le tableau 11 présente les résultats de l'analyse de groupement hiérarchique, de même que les caractéristiques de chacun des six groupes de barrages, et l'intervalle des cotes finales de franchissabilité amont. Selon cette analyse, un seul barrage serait franchissable sans difficulté apparente (cote 1), 5,5 % seraient partiellement franchissables (cote 2), 5,3 % seraient difficilement franchissables, alors que la majorité, soit 89,1 % des barrages, serait des obstacles totalement infranchissables (Tableau 11).

impassable;

- **Group 6 (n = 812):** dams of rather low height (0.6–1.98 m), and made of of impassable material.

These six groups were selected according to validation indices and various cluster trials. By associating upstream passability ranks for the classes of dam heights and for types of material (Tables 8 to 10) with the six dam groups obtained from analysis, an overall upstream passability rank was determined.

The final passability rank was set at that of the highest rank. Thus the final rank recorded in the database for upstream passability is the higher rank of the two assessment criteria considered, i.e., of the passability rank for the dam height and that for type of material. Table 11 presents the results of the hierarchical cluster analysis as well as the characteristics of each of the six groups of dams, and the interval of final upstream passability ranks. According to this analysis, only one dam would be passable without apparent difficulty (rank 1), 5.5% would be partially passable (rank 2), 5.3% would be almost impassable, whereas the majority, i.e., 89.1% of the dams, would be entirely impassable (Table 11).

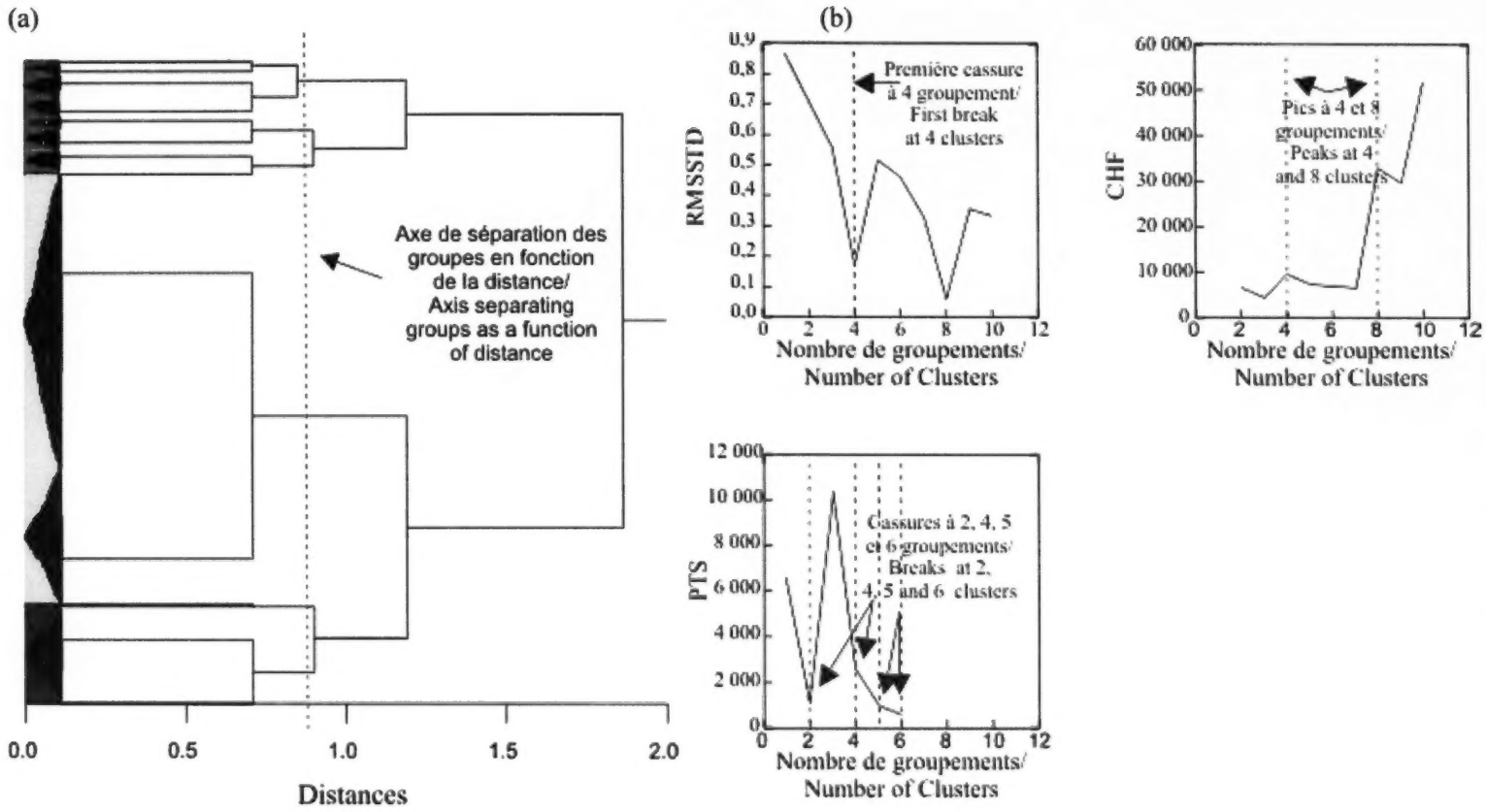


Figure 6. (a) Analyse de groupement hiérarchique des barrages sur la base de deux variables, les cotes de hauteur du tableau 9 et les cotes associées au type de matériaux du tableau 10 ; (b) Indice de validation du nombre de groupements obtenus selon trois critères. Indices: Root-mean-square standard deviation (RMSSTD); Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS).

Figure 6. (a) Hierarchical cluster analysis of dams based on two criteria (height and material classes, from Tables 9 and 10); (b) Validation index of numbers of clusters according to three criteria. Indices: Root-mean-square standard deviation (RMSSTD); Pseudo F (CHF), Pseudo T-square (PTS).

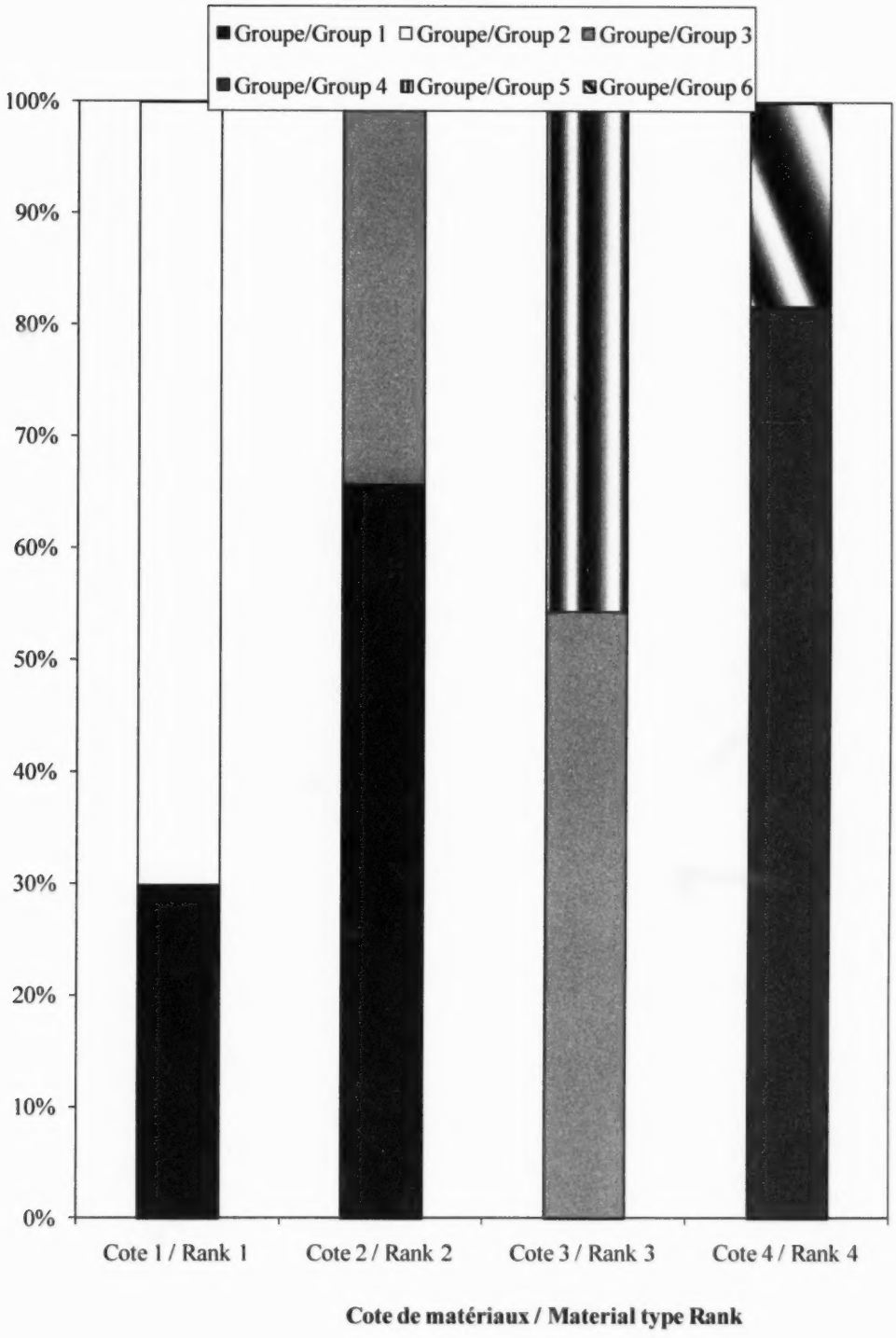


Figure 7. Proportion de barrages par catégorie de matériaux (du plus perméable au plus imperméable) dans les différents groupements obtenus par l'analyse de groupement.

Figure 7. Proportion of dams by material category (from the most permeable to the most impervious) in groups established by the cluster analysis.

Tableau 11. Résultats de l'analyse de groupement hiérarchique pour la franchissabilité amont.
Table 11. Hierarchical cluster analysis results for upstream passability.

Groupe / Group	Nb de barrages / Dam Nbr	Gamme de hauteurs / Height variation (m)	Cote Hauteur / Height Rank	Cote Matériaux / Material Rank	Cote finale de franchissabilité amont /Final Rank for upstream passabilty [a]	Nb de barrages par cote / Nbr of dams by rank
1	474	0.8–2.95 m	1, 2, 3	1, 2	1 ou 2, pour les barrages plus petits de 1 m (dépend du type de matériaux associé) / 1 or 2 for dams of less than 1 m (depends on material type)	1 (cote / rank 1)
					2, pour ceux d'une hauteur comprise entre 1 et 2 m / 2, for dams between 1 and 2 m in height	301
					3, pour ceux d'une hauteur égale ou supérieure à 2 m / 3, for dams of 2 m and more	172
2	274	2–155 m	3, 4	1	3, pour les barrages de moins de 3 m / 3, for dams of less than 3 m	93
					4, pour les barrages plus grand ou égal à 3 m / 4, for dams of 3 m and more	181
3	217	3–15.2 m	4	2, 3	4	217
4	3,640 [b]	2–214 m	3, 4	4	4	3,640
5	26	1.0–2.8 m	2, 3	3	3	26
6	812	0.6–1.98 m	1,2	4	4	812

Cote de franchissabilité / Passability rank	Appréciation du franchissement amont / Assessment of upstream passability
1	Franchissable (sans difficulté apparente) / Passable without apparent difficulty
2	Franchissable partiellement ou avec une certaine difficulté/ Passable at times or with some difficulty
3	Difficilement franchissable / Nearly impassable
4	Infranchissable / Impassable

[a] Cote la plus sévère de l'interaction hauteur / matériaux) / Upstream passability final rank (most severe from the height / material interaction).

[b] Groupe 4: 3,640 barrages, dont 1,142 (31.4%) de moins de 3 m. / Group 4: 3,640 dams including 1,142 of less than 3 m in height.

7.5 VALIDATION DES COTES DE FRANCHISSABILITÉ AMONT PAR PHOTO-INTERPRÉTATION

L'attribution de la cote finale de franchissabilité amont est fonction de l'appartenance des barrages à l'un des six groupes de barrages formés, eux-mêmes fonction des deux critères retenus pour la montaison, soit la hauteur de barrage et le type de matériaux. Toutefois, l'attribution de cette cote sur la base des analyses décrites ci-dessus peut conduire à une interprétation erronée ou non optimale de la franchissabilité amont puisque seules deux variables ont été considérées et que seule la cote la plus sévère (élevée) des deux variables a été retenue pour la détermination de la cote finale de franchissabilité amont. Pour évaluer la situation, des observations ont été effectuées par une analyse dite *a posteriori* de photo-interprétation sur un sous-échantillon de barrages. Alors que la photo-interprétation a été effectuée sur tous les barrages identifiés franchissables ainsi que tous ceux du groupe 5, dont l'effectif est faible (n=26), un sous-échantillon (10 %) aléatoire de barrages répartis dans les groupes 3, 4 et 6 a été réalisé. Au total, 1,078 photos (19,8 % des barrages) ont été examinées (Tableau 12).

Pour chacun des barrages ayant été l'objet d'une photo-interprétation, une comparaison a été effectuée avec la cote attribuée par l'analyse de groupement (Tableau 11). Les barrages dont l'évaluation a été impossible en raison d'un angle de photo non optimal n'ont pas été retenus pour cet exercice de validation.

Selon les cotes attribuées par photo-interprétation, l'échantillon de cotes validées est composé majoritairement de barrages de cote 2 (partiellement franchissable; 30,8 %), de cote 3 (difficilement franchissable; 26,0 %) et de cote 4 (infranchissable; 29,8 %). La validation indique que l'attribution des cotes

7.5 VALIDATION OF UPSTREAM PASSABILITY RANKS USING PHOTO-INTERPRETATION

The assignment of the final upstream passability rank is a function of the dams' belonging to one of the six dam groups formed, the groups themselves being based on the two criteria selected for upstream passage, i.e., dam height and material type. However, rank assignment on the basis of the analyses described above may result in an invalid or non-optimal interpretation of upstream passability because only two variables were considered and only the most extreme (highest) rank was retained as the final upstream passability rank. To assess the situation, photographs of dams were examined after ranks were assigned in an attempt to assess their accuracy. We refer to this as "photo-interpretation". Whereas the ranks of all dams identified as passable and those of dams in group 5 (n=26) were photo-interpreted, dams of groups 3, 4, and 6 were randomly subsampled (10%). A total of 1,078 photos (19.8% of the dams) were studied (Table 12).

For each of the dams subjected to photo-interpretation, a comparison was made with the rank assigned based on cluster analysis (Table 11). We did not evaluate the dams where the angle of view of the photograph was not appropriate.

According to photo-interpretation, dams were classified into rank 2 (partially passable; 30.8%), rank 3 (almost impassable; 26.0%), and rank 4 (impassable; 29.8%) obstacles. Thus rank assignment using only two variables (height and type of material)

par seulement deux variables (hauteur de barrage, type de matériaux) ne concorde pas nécessairement avec les cotes établies par photo-interprétation. En effet, sauf pour les barrages cotés infranchissables, la correspondance est faible, et même très faible dans le cas des cotes 1 et 3 (Tableau 13). Ceci résulte du fait que la pente des ouvrages et la nature des berges influencent grandement l'évaluation de la franchissabilité amont. Le type de matériaux de construction du barrage a une influence sur la pente de l'ouvrage. Par exemple, les barrages en déversoir libre en enrochement présentent une pente et un substrat rugueux favorable au franchissement vers l'amont, et ce, même si l'ouvrage est de plus de 3 m. Bien qu'il existe des disparités dans les résultats entre les deux méthodes (analyse de groupement, photo-interprétation), les barrages franchissables (cote 1) demeurent peu représentés dans les deux cas. Les deux approches permettent également de bien identifier les barrages infranchissables, avec une concordance de 88,5 % (Tableau 13). Ainsi, les cotes de hauteur de barrage et le type de matériaux, soit la cote finale de franchissabilité, sont utiles pour identifier les barrages infranchissables.

does not match consistently those determined from photographs. In fact, except for the dams ranked impassable, the correspondence is low, especially in the case of ranks 1 and 3 (Table 13). This stems from the fact that the slope of the structures and the nature of the banks greatly affect the assessment of upstream passability. For instance, rockfill free weir dams present a slope and a rough substrate favourable to upstream passage even if the structure is higher than 3 m. Although there are disparities in the results between the two methods (cluster analysis, photo-interpretation), the passable dams (rank 1) are still under-represented in both cases. Both methods also made it possible to properly identify impassable dams, with a concordance of 88.5% (Table 13). Thus, dam height and type of material, or the final passability rank, are useful for identifying impassable dams.

Par ailleurs, dans le cas des barrages en terre, les photos ne permettaient généralement pas d'établir avec certitude s'il y avait ou non possibilité de passage pour l'anguille. Par exemple, il était impossible de déterminer si les barrages en terre (digues de terre) étaient jumelés à des ouvrages annexes (évacuateur de crue, vidange de fond, passe à poissons, etc.) permettant le passage du poisson. Néanmoins, pour les barrages des complexes hydroélectriques les plus imposants, les ouvrages en terre étaient bien identifiés comme étant des digues. Dans ce cas, aucune montaison n'étant possible, une cote de franchissabilité amont de 4, soit d'infranchissable, a été attribuée à l'obstacle. Les barrages en contreforts, caissons ou chandelles de bois ont également été problématiques lors de la photo-interprétation

Earthfill dams gave rise to limited validation because photos did not enable us to determine with certainty whether dams were passable to eel. For example, one could not determine whether earthfill dams (embankment dam) had a discharge system (e.g., spillway, low-level outlet) allowing the passage of fish. Nevertheless, for the largest hydropower complex dams, earthfill structures were properly identified as dikes. In this case, no upstream passage is possible and an upstream passability rank of 4, i.e., impassable, was assigned to the obstacle. Dams with cribs, buttresses, or dead shores were also problematic for photo-interpretation and thus for the assessment of upstream

et donc dans l'évaluation de la franchissabilité amont. De fait, ceux-ci offrent un éventail de possibilités de franchissement dépendant de leur état et de leur étanchéité. Certains ouvrages sont totalement étanches et n'offrent donc aucun passage vers l'amont, surtout lorsque la structure est imposante en hauteur (cotes 3 et 4); alors que d'autres sont complètement ennoyés ou effacés et ne constituent donc plus un obstacle à la montaison (cote 1). Néanmoins, leur classement comme obstacles franchissables avec retard, basé sur la hauteur et le type de matériaux, semble justifié dans la majorité des cas sur le terrain, même si les photos interprétées suggéraient à l'occasion un classement autre.

passability. In fact, these offer a range of passage possibilities, depending on their state and their imperviousness. Certain structures are entirely impervious and thus do not allow any upstream passage, especially when the structure is very high (ranks 3 and 4), whereas others are entirely submerged or eliminated and no longer constitute an obstacle to upstream passage (rank 1). Nevertheless, their classification as passable obstacles with delay, based on height and type of material, appears justified in most cases in the field, even though photos may suggest otherwise.

Tableau 12. Répartition des barrages de la base de données du CEHQ par groupe et nombre de barrages ayant fait l'objet d'une photo-interprétation.

Table 12. Distribution of dams listed in the CEHQ database across groups, and number of dams for which photographs were examined.

Groupe de barrages / Dam group	Nombre de barrages dans le groupe / Nbr of dams within the group	Nombre de barrages photo-interprétés / Nbr of dam photos interpreted	Proportion des barrages examinés par groupe / Proportion of dams examined by group (%)
1	474	474	100 %
2	274	Groupe de moins de 3 m de hauteur / Group of less than 3 m: 93	100 %
		Groupe d'une hauteur ≥ 3 m / Group of 3 m and more: 18	10 %
3	217	22	10 %
4	3,640	364	10 %
5	26	26	100 %
6	812	81	10 %
Total	5,443	1,078 (19.8 %)	

Tableau 13. Comparaison entre les cotes de franchissabilité attribuées par la combinaison des cotes de matériaux et de hauteurs (analyse de groupement) et celles obtenues par l'examen des photographies.

Table 13. Comparison between passability ranks assigned through the cluster analysis (height and material ranks) and the photo interpretation.

Cote finale de franchissabilité obtenue par l'analyse de groupement / Final passability rank through the cluster analysis	Validation selon la photo interprétation / Photo-interpretation validation					Total
	Cote 1 / Rank 1	Cote 2 / Rank 2	Cote 3 / Rank 3	Cote 4 / Rank 4	Cote *nd* / Rank *na*	
1	1					**1**
2	34	72	35	7	*153*	**301**
3	26	56	19	10	*154*	**265**
4	5	25	75	131	*275*	**511**
Total	**66**	**153**	**129**	**148**	*582*	**1,078**
% d'exactitude / % correspondence	**1.5**	**47.1**	**14.7**	**88.5**	-	
Proportion des barrages par cote * / Dam proportion by rank (%)	**13.3**	**30.8**	**26.0**	**29.8**	-	**100**

Cote de franchissabilité / Passability rank	Appréciation du franchissement amont / Assessment of upstream passability
1	Franchissable (sans difficulté apparente) / Passable without apparent difficulty
2	Franchissable partiellement ou avec une certaine difficulté/ Passable at times or with some difficulty
3	Difficilement franchissable / Nearly impassable
4	Infranchissable / Impassable

* Les barrages présentant la cote *nd* n'ont pas été considérés dans le calcul des proportions; n = 496 barrages pour les calculs. / Dams with rank *na* were not considered in the proportion calculated; n = 496 dams.

7.6 DESCRIPTION DES DEUX CRITÈRES RETENUS POUR L'ÉVALUATION DE LA FRANCHISSABILITÉ AVAL

Pour l'évaluation de la franchissabilité aval, les résultats obtenus par l'analyse de groupement à la section 7.3 ont été utilisés. Des sept groupes de barrages obtenus selon cette analyse, quatre groupes étaient caractérisés par un seul type d'usage, soit l'hydroélectricité. Le type d'utilisation des barrages peut donc servir de premier critère d'évaluation pour la franchissabilité aval, soit lors de la dévalaison de l'anguille. Deux classes sont proposées en regard du type d'utilisation des barrages, l'une hydroélectrique et l'autre rassemblant toutes les autres utilisations. La considération de ces

7.6 DESCRIPTION OF THE TWO CRITERIA SELECTED FOR THE ASSESSMENT OF DOWNSTREAM PASSABILITY

To assess downstream passability, the results obtained from cluster analysis in section 7.3 were used. Of the seven groups of dams obtained from this analysis, four groups were formed that included only one type of use, namely hydroelectricity. The type of dam use can serve as the first assessment criterion for downstream passability, i.e., when eel migrate downstream. Two classes of dam use type are proposed, one hydroelectric and the other including all other uses.

deux seules catégories se base sur le fait que seuls les barrages hydroélectriques peuvent être munis de turbines et donc engendrer assurément des mortalités significatives chez l'anguille. En l'absence de turbines, tous les barrages des autres usages (utilisation) agissent sensiblement de la même façon sur la rétention des poissons dans l'axe migratoire et sur le franchissement vers l'aval. De fait, la hauteur de chute devient la principale variable pouvant limiter la franchissabilité aval, en induisant des mortalités lors de la chute des anguilles argentées immédiatement en aval du barrage.

Consideration of these two categories is based on the fact that only hydroelectric dams can be equipped with turbines and thereby cause significant eel mortality. In the absence of turbines, all the dams with other uses mainly have the same impact on retaining fish in the migration route and on downstream passability. In fact, the waterfall height becomes the main variable limiting downstream passability, causing mortalities during the fall of silver eels immediately downstream of the dam.

7.6.1 Cotes retenues pour l'utilisation des barrages (cotes 2 et 3)

Une approche conservatrice a été jugée appropriée pour l'établissement des cotes de franchissabilité en fonction de l'usage associé au barrage. Ainsi, aucune cote 1 n'a été attribuée selon le type d'utilisation des barrages. Une cote 2 a été attribuée à tous les barrages sauf ceux servant à l'hydroélectricité. Les barrages d'utilisation hydroélectrique possèdent une ou plusieurs turbines, dispositif au cœur des centrales hydroélectriques. Les turbines entraînent des mortalités directes aux géniteurs en dévalaison, mais aucune information spécifique à chacun des barrages n'était disponible pour cette étude. Ainsi, ne pouvant quantifier le taux de mortalité à chacun des barrages, une cote 3 a été associée aux barrages hydroélectriques. Pour considérer une cote 4, un taux de moralité de 100% doit être observé. Ces cotes devront être revues lorsque les informations pertinentes deviendront disponibles.

7.6.1 Ranks selected for dam use (ranks 2 and 3)

A cautionary yet conservative approach was considered appropriate for determining passability ranks as a function of dam usage. Thus no dam was attributed rank 1 based on the type of use. Rank 2 was assigned to dams serving all purposes but hydroelectricity. The dams used to produce hydroelectricity have one or several turbines, the key feature of hydroelectric powerhouses. While turbines cause direct mortalities to downstream migrants, no information specific to each dam was available for this study. Thus a rank 3 (and not a rank 4) was assigned to hydroelectric dams. Rank 4 would be attributed only where 100% mortality occurs. These ranks will have to be reviewed when pertinent information becomes available.

7.6.2 Cotes retenues pour la hauteur des barrages (cotes 2 et 4)

Puisque la hauteur de barrage est connue pour l'ensemble des barrages répertoriés dans la

7.6.2 Ranks selected for dam height (ranks 2 and 4)

Since dam height is known for all dams listed in the CEHQ database,

base de données du CEHQ, cette variable peut servir à attribuer des cotes de franchissabilité aval aux groupes de barrages identifiés par l'analyse de groupement. En situation de chute libre, la hauteur de chute limite pour une anguille argentée a été évaluée à 13 m (Larinier et Travade 1999, 2002). La différence entre la hauteur de retenue et la hauteur du barrage est en moyenne de 2,56 m pour les barrages d'une hauteur de plus de 3 m répertoriés dans la base de données du CEHQ (Tableau 9). Ainsi, puisque la hauteur de retenue s'apparente à la hauteur de chute, les barrages d'une hauteur de plus de 15,5 m ont été classés infranchissables (cote 4). Les barrages dont la hauteur de barrage est inférieure à 15,5 m peuvent donc obtenir une cote variant entre 1 et 3, selon les autres facteurs agissant sur la franchissabilité aval. Une cote médiane de 2 a donc été retenue pour les barrages dont la hauteur était inférieure à 15,5 m.

this variable can be used to assign downstream passability ranks to the groups of dams identified through cluster analysis. In a situation of free fall, the limit for the waterfall height for a silver eel was assessed at 13 m (Larinier and Travade 1999, 2002). The difference between storage depth and dam height is on average 2.56 m for dams with a height exceeding 3 m listed in the CEHQ database (Table 9). Thus, since the storage depth is akin to waterfall height, dams of a height of over 15.5 m were classed impassable (rank 4). Dams whose dam height is less than 15.5 m can therefore be assigned a rank ranging from 1 to 3, depending on the other factors affecting downstream passability. Dams less than 15.5 m in height were assigned rank 2.

Étant donné le peu d'informations disponibles pour l'établissement de cotes de franchissabilité aval, la grille du tableau 14 présente un ordre de grandeur de la franchissabilité aval des obstacles pour l'anguille, mais doit être interprétée avec prudence. En effet, dans la littérature, aucune grille n'a été établie en fonction de critères spécifiques, si ce n'est que sur des taux de mortalité calculés à partir de mortalités observées. Ainsi, aucune cote 1 n'a pu être attribuée dans le cas présent puisque les données fournies ne comportent aucune variable biologique permettant de statuer à cet effet. En préconisant une approche conservatrice, une cote 2 (et non une cote 1) a été attribuée aux hauteurs de barrages inférieures à 15,5 m dont l'utilisation n'était pas hydroélectrique, soit de tous les autres usages.

Given the scarce information available for establishing downstream passability, information in Table 14 presents a rough estimate for the downstream passability of obstacles for eel, but must be interpreted with caution. In fact, the literature indicates that no assessment grid was established as a function of specific criteria, except for mortality rates calculated based on observed mortalities. For this reason, no rank 1 could be assigned in this case because the data provided contain no biological variables that would allow any decisions to be made for this purpose. Advocating a conservative approach, we assigned rank 2 (and not a rank 1) to heights of dam under 15.5 m that were used for purposes other than producing hydroelectricity.

Tableau 14. Cote de franchissabilité aval extrapolée aux données disponibles dans la base de données du CEHQ.

Table 14. Downstream passability rank for eels projected from CEHQ database variables.

Critère d'évaluation / Assessment criterion	Caractéristiques / Characteristics	Cote de franchissabilité aval / Downstream passability rank
Hauteur de barrage / Dam height	< 15.50 m	2
	≥ 15.50 m	4
Type d'utilisation / Use type	Hydroélectrique / Hydroelectric	3
	Autres / Others	2
Cote de franchissabilité / Passability Rank	**Appréciation du franchissement aval / Assessment of downstream passability**	
1	Franchissable sans difficulté apparente / Passable without apparent difficulty (free passage ensured at all flow levels)	
2	Obstacle partiellement franchissable, mais délais significatifs encourus Partially passable, but significant delays encountered	
3	Obstacle difficilement franchissable, car délais significatifs encourus et mortalités significatives / Almost impassable because of significant delays encountered, and significant mortalities	
4	Infranchissable / Impassable (100% mortality)	

7.6.3 Description des groupes de barrages selon les deux critères retenus pour la franchissabilité aval

Les sept groupes de barrages obtenus lors de la première analyse de groupement (section 7.3) peuvent être utilisés directement dans l'établissement des cotes de franchissabilité aval suite à la revue de littérature et aux cotes établies au tableau 14. Le tableau 15 présente les cotes finales de franchissabilité aval pour chacun des groupes obtenus par l'analyse de groupement. Comme pour la franchissabilité amont, c'est la cote la plus sévère (élevée) entre les deux variables qui est retenue comme cote finale de franchissabilité aval pour un groupe de barrages donné. Ainsi, selon les groupements de barrages obtenus par l'analyse, la cote finale inscrite à la base de données pour la franchissabilité aval est la cote la plus élevée des deux critères d'évaluation considérés, soit entre la cote de franchissabilité pour la hauteur de

7.6.3 Description of dam groups based on two criteria selected for downstream passability

The seven groups of dams obtained from the first cluster analysis (section 7.3) can be directly used to determine downstream passability ranks following the literature review and the ranks determined in Table 14. Table 15 presents the final downstream passability ranks for each of the groups obtained through cluster analysis. As is the case for upstream passability, the most extreme (highest) rank of the two variables is retained as the final downstream passability rank for a given group of dams. Thus, according to the dam clusters obtained through analysis, the final rank recorded in the database for downstream passability is the highest rank of the two assessment criteria considered, i.e., between the passability rank for dam height and the

barrage et celle du type d'utilisation (hydroélectrique vs les autres types). Ainsi, selon cette analyse, 86 % des barrages seraient des obstacles partiellement franchissables occasionnant des délais significatifs (cote 2; Figure 8), et 9,6% seraient difficilement franchissables occasionnant des délais et des mortalités significatives (cote 3; Figure 8). Cette analyse ne prend toutefois pas en considération le fait qu'il y ait ou non des dispositifs facilitant la dévalaison. Les barrages seraient totalement infranchissables uniquement dans 4,4% des cas (Figure 8).

rank for use type (hydroelectric vs. other types). According to this analysis, 86% of the dams would be partially passable obstacles causing significant delays (rank 2; Figure 8), and 9.6% of the dams would be nearly impassable because of significant delays and mortalities (rank 3; Figure 8). However, this analysis does not take into account whether or not there are facilities to support downstream passage. The dams would be impassable in only 4.4% of cases (Figure 8).

Tableau 15. Résultats de l'analyse de groupement pour la franchissabilité aval.
Table 15. Results from the cluster analysis for downstream passability.

Groupe / Group	Nb de barrages / Dam Nbr	Gamme de hauteur / Height variation (m)	Cote Hauteur / Height rank	Type d'utilisation / Use type	Cote Utilisation / Use rank	Cote finale de franchissabilité aval/ Final rank for downstream passability*	Nb de barrages par cote / Nbr of dams by rank
1	4	3.0–5.0	2	Hydro	3	< 15.50 m et / and Hydro: 3	4
2	23	0.60–3.60	2	Hydro	3	< 15.50 m et / and Hydro: 3	23
3	4560	0.70–13.00	2	Hydro (n = 45) Autres / Others (n =4515)	2, 3	< 15.50 m et / and Autres / Others: 2	4515
						< 15.50 m et / and Hydro: 3	45
4	1	28.20	4	Hydro	3	≥ 15.50 m et / and Hydro : 4	1
5	744	2.00–53.00	2, 4	Hydro (n =576) Autres / Others (n =168)	2, 3	< 15.50 m et / and Autres / Others: 2	168
						< 15.50 m et / and Hydro: 3	448
						≥ 15.50 m et / and Hydro : 4	128
6	109	9.00-168.20	2, 4	Hydro	3	< 15.50 m et / and Hydro: 3	3
						≥ 15.50 m et / and Hydro : 4	106
7	2	155.00-214.00	4	Hydro	3	≥ 15.50 m et / and Hydro : 4	2

Cote de franchissabilité / Passability Rank	Appréciation du franchissement aval /Assessment of downstream passability
1	Franchissable sans difficulté apparente / Passable without apparent difficulty (free passage ensured at all flow levels)
2	Obstacle partiellement franchissable, mais délais significatifs encourus / Partially passable, but significant delays encountered
3	Obstacle difficilement franchissable, car délais significatifs encourus et mortalités significatives / Almost impassable because of significant delays encountered, and significant mortalities
4	Infranchissable / Impassable (100% mortality)

* Cote la plus sévère de l'interaction hauteur x utilisation / Downstream passability final rank (more severe from the height x use interaction).

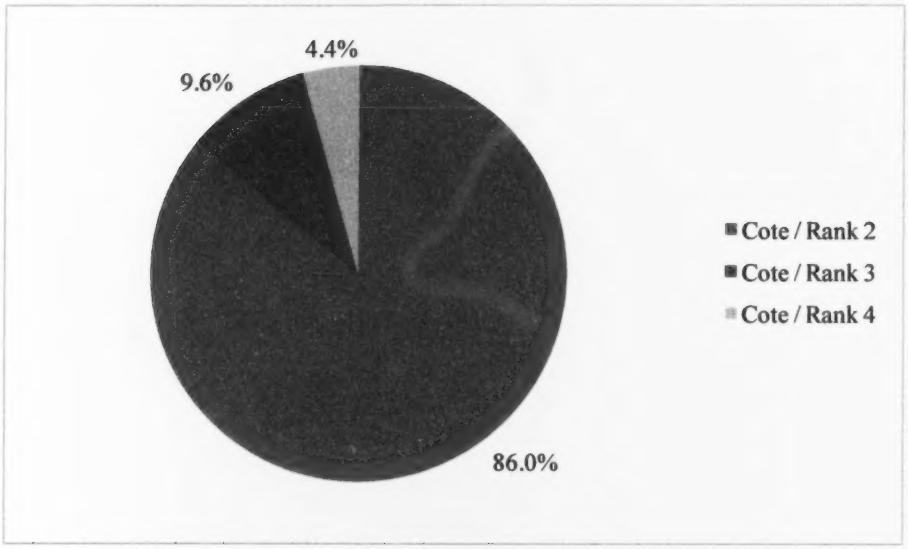


Figure 8. Répartition des cotes de franchissabilité aval.
Figure 8. Distribution of downstream passability ranks.

8.0 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA PROCÉDURE RETENUE

Au Québec, on dispose d'une base de données regroupant tous les barrages assujettis à la *Loi sur la sécurité des barrages* (L.R.Q., chapitre S-3.1.01). Néanmoins, cette base de données du CEHQ n'a pas été conçue pour permettre l'évaluation de la franchissabilité par la faune aquatique. De fait, celle-ci sert plutôt de répertoire pour les barrages. Dans ce répertoire, les ouvrages ont été classifiés au fur et à mesure que de nouvelles évaluations étaient réalisées sur le terrain. Ainsi, les données considérées dans la présente évaluation sont largement tributaires des informations recueillies lors la prise de données des visites sur le terrain, de même qu'à la compilation des données jugées pertinentes à l'incorporation dans la base de données du CEHQ. Entre autres, l'évaluation du type de matériau dépend de la définition appliquée par le personnel procédant à l'évaluation et à la caractérisation des ouvrages. La base de données étant implantée depuis plusieurs années, celle-ci n'est modifiée que lorsque de nouvelles visites sont planifiées sur le terrain. À titre indicatif, la priorité en termes de visite sur le terrain est donnée aux barrages de forte contenance (J. Vallerand, CEHQ, comm. pers.). De plus, bien que certains barrages soient composés d'une combinaison de matériaux, seul un type est inscrit dans la base de données, lequel ne représente donc pas nécessairement le type le plus favorable à la franchissabilité amont par l'anguille. Cette variable se réfère au type de matériaux utilisés pour la partie principale ou centrale du barrage (J. Vallerand, CEHQ, comm. pers.).

8.0 ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF THE SELECTED PROCEDURE

In Quebec, the availability of a database containing information on all the dams subject to the *Dam Safety Act* (R.S.Q., chapter S-3.1.01) is a major asset. However, the CEHQ database was not designed to assess passability for aquatic wildlife. In fact, its purpose is to serve as a directory of dams. In this directory, dams were described and added gradually as new assessments were conducted in the field. The data gathered are limited to variables considered relevant for the CEHQ mandate, i.e., for security purposes, with only part of the data being made available in the database. Among other things, the assessment of the type of material depends on the definition applied by staff assessing and characterizing the structures. Since the database has been in existence for several years, it is only modified when new field visits are planned. Priority in terms of field visits is given to high-capacity dams (J. Vallerand, CEHQ, pers. comm.). Furthermore, although certain dams are composed of a combination of materials, only one type is recorded in the database, and it does not necessarily represent the most favourable type for upstream passability for eel. Rather it refers to the material used for the central or main part of the dam (J. Vallerand, CEHQ, pers. comm.).

De plus, la base de données du CEHQ contient peu de variables numériques disponibles pour l'ensemble des barrages répertoriés. De fait, la seule variable disponible pour l'ensemble des ouvrages était la hauteur du barrage. La longueur de l'ouvrage notée dans la base de données représentait la longueur entre les deux rives du cours d'eau, plutôt que la longueur qu'occupe le barrage dans le cours d'eau. Si une telle variable avait été disponible, le ratio hauteur (H) / longueur (L) aurait servi à caractériser le profil de l'ouvrage en terme de pente ou d'inclinaison des parements aval de l'obstacle. Rappelons que ce ratio est utilisé par Steinbach (2006) et Muchiut et al. (2007). Mis à part la hauteur de chute, les autres variables intéressantes à prendre en compte lors de l'évaluation de la franchissabilité aval et qui ne sont pas répertoriées dans la base de données du CEHQ sont : la présence de dispositifs de franchissement et la présence de turbines (type, diamètre de la roue, vitesse de rotation, débit turbiné) sur les barrages hydroélectriques.

Furthermore, the CEHQ database contains few numerical variables available for all of the listed dams. In fact, the only variable available for all of the structures was the dam height. The length of the dam recorded in the database represents the length between the two banks of the watercourse, rather than the length occupied by the dam in the watercourse. If such a variable had been available, the height (H) / length (L) ratio would have been used to characterize the profile of the structure in terms of slope or incline of the downstream faces of the obstacle. Note that this ratio is used by Steinbach (2006) and Muchiut et al. (2007). Apart from the waterfall height, the other variables of interest to be taken into account when assessing downstream passability and which are not listed in the CEHQ database are the presence of passage facilities and the presence of turbines (type, diameter of runner, rotational speed, throughput) at hydroelectric dams.

Par ailleurs, aucune donnée n'est disponible quant aux conditions hydrologiques, tant dans la base de données que sur les photographies. Les paramètres hydrauliques tels que les débits et les vitesses du courant à l'amont et à l'aval des ouvrages auraient été utiles à l'évaluation de la franchissabilité, puisque cette évaluation doit tenir compte des éléments recherchés par l'anguille, notamment l'appel d'eau principal, et ce, tant en période de montaison que de dévalaison. Lorsque l'on compare les hauteurs de barrages avec les hauteurs de retenue, on constate que la hauteur de retenue est dans certains cas la même que la hauteur du barrage, alors que certains barrages ont une hauteur de retenue nulle.

Moreover, no data on hydrological conditions are available, either in the database or in the photographs. Hydraulic parameters such as flow and current velocities upstream and downstream of the structures would have been useful for the assessment of passability. The assessment has to be done based on the eel's behavior—including its attraction to the main flow—and during both upstream and downstream migration. When dam heights are compared to storage depths, in some cases the dam storage depth is the same as the dam height, whereas some dams have null values for storage depth. It may be presumed that certain measurements were taken during flood

On peut présumer que certaines mesures ont été prises en période de crue, alors que d'autres sont plutôt représentatives d'inventaires réalisés en période d'étiage. Rappelons que les migrations chez l'anguille ont lieu en période de décrue et d'étiage. Néanmoins, il est important de souligner que les photographies analysées ne sont donc pas totalement représentatives de conditions d'hydraulicité moyenne.

seasons, whereas others may be more representative of low-water periods. It should be remembered that eel migration occurs after spring flood is over and during low-water periods. Nevertheless it is important to emphasize that the photographs analyzed are therefore not entirely representative of the average water conditions.

Le CEHQ ne rend accessible qu'une photo par barrage. Cette photo n'a évidemment pas été prise à des fins d'évaluation de la franchissabilité d'une espèce piscicole. Ainsi, les photos ne mettent pas nécessairement en valeur les éléments recherchés dans le cadre de la présente étude : date de la photo, appel d'eau principal, vue amont, vue aval, vue permettant de bien voir les caractéristiques des berges, la possibilité de présence d'une voie de contournement, etc. Des photos de vue d'ensemble, et de vue ciblée sur la voie principale d'écoulement et de franchissement, de même que sur les berges, et ce, de l'aval vers l'amont, auraient été bénéfiques à l'évaluation de la franchissabilité.

The CEHQ only provides one photo per dam. This photo was not taken for the purpose of assessing passability for a fish species. Thus photos do not necessarily include key elements required for the present study, such as photo date, main water intake, upstream view, downstream view, a view clearly illustrating the characteristics of banks, presence of a by-pass route, and so on. General view photos and photos targeting the main flow and passage route as well as both upstream and downstream banks would have been beneficial to the assessment of passability.

La prochaine étape de la démarche serait de procéder à la validation des cotes de franchissabilité avec la présence/absence observée et/ou des densités connues des anguilles à l'amont des obstacles sur les biefs amont de quelques bassins versants aux caractéristiques physiques différentes les unes des autres.

The next step in our approach would be to procede to a ranking validation by assessing passability ranks with presence/ absence accounts or density records of eels above obstacles in the upper reaches of some watersheds with different physical characteristics.

9.0 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Des cotes de franchissabilité amont et aval ont été provisoirement assignées aux barrages répertoriés dans la base de données géoréférencées du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP).

Intégrées à l'outil de gestion que le MPO développe actuellement (SIG), les cotes de franchissabilité permettront de repérer les ouvrages problématiques pour les déplacements de l'anguille. Ainsi, dans une perspective de validation de choix de gestion de l'habitat du poisson, ces cotes pourront être utilisées afin établir des priorités de gestion face à des gains en superficie d'habitats potentiels pour l'anguille.

9.1 BILAN SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES BARRAGES

Les barrages présents dans la base de données présentent une grande diversité en termes de caractéristiques physiques et servent pour de multiples usages. Basé sur l'information disponible dans la base de données du CEHQ, deux groupes de variables quantitatives ont été identifiés; l'un caractérisant l'importance physique de l'obstacle (hauteur du barrage, hauteur de retenue, longueur de l'ouvrage) et l'autre définissant l'importance du secteur amont (capacité de retenue et débit calculé). L'analyse de groupement hiérarchique effectuée avec les variables hauteur de barrage, capacité de retenue, type de matériaux et type d'utilisation a permis de former sept groupes distincts de barrages.

9.0 CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

Upstream and downstream passability ranks were temporarily assigned to the dams listed in the georeferenced database of the Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP).

Incorporated into the management application that DFO is developing, the passability ranks will make it possible to identify dams that are problematic for eel movements. Thus, from the perspective of validating fish habitat management decisions, these ranks can be used to determine management priorities with regard to potential surface area gains for eel habitat.

9.1 SUMMARY OF DAM CHARACTERISTICS

The dams listed in the database present a great variety of physical characteristics and are used for all kinds of purposes. Based on information available in the CEHQ database, two groups of quantitative variables were identified, one describing the importance of the obstacle to eels (dam height, storage depth, length of structure) and the other identifying the size of the potential eel habitat upstream from the obstacle (calculated flow and impounding capacity). The hierarchical cluster analysis conducted with the variables dam height, impounding capacity, type of material, and type of use made it possible to form seven distinct groups of dams.

9.2 Bilan sur la méthode pour évaluer la franchissabilité amont

Deux variables, la hauteur du barrage et le type de matériaux, ont servi à établir la charte de franchissabilité en période de montaison de l'anguille. Soulignons toutefois que la base de données ne permettait pas d'attribuer une pente aux barrages. La photo-interprétation sur un sous-échantillon de barrages a permis de donner une cote à partir d'autres variables jugées pertinentes à l'évaluation de la franchissabilité amont pour l'anguille. La pente des ouvrages explique grandement la non-concordance entre les analyses statistiques et la photo-interprétation. Les deux méthodes ont tout de même identifié les barrages infranchissables pour l'anguille en montaison. De cette façon, les barrages infranchissables de faible hauteur pourraient être aménagés ou démantelés selon une priorité de gestion. Cette stratégie serait bénéfique à toutes les espèces de poissons puisqu'elle assurerait du coup la libre circulation dans l'habitat du poisson.

9.2 Summary of the upstream passability assessment method

Two variables, dam height and type of material, were used to establish a chart showing passability during the period of upstream migration for eel. However, the database does not allow the assignment of a slope to the dams. Observations of new variables, such as slope, deemed pertinent for the assessment of passability were made from photos for a subset of dams and a new score was determined. The two scores differed in many respects, and slope was the main variable explaining the non-concordance, but both methods consistently identified impassable dams. Based on the information available, impassable dams of low height can be located and could be targeted as a management priority. This strategy would be beneficial to all fish species because it would at the same time ensure free passage in fish habitat.

9.3 Bilan sur la méthode pour évaluer la franchissabilité aval

Les groupements obtenus par l'analyse hiérarchique peuvent être utilisés pour attribuer une cote de franchissabilité aval de l'anguille en regard de la hauteur du barrage et du type d'utilisation (hydroélectrique vs autres usages). Contrairement à l'évaluation de la franchissabilité amont, pour la franchissabilité aval, aucune validation n'a pu être réalisée *a posteriori* à l'aide des fiches de données du CEHQ. Lors de la rédaction de ce rapport, aucune donnée n'était disponible quant à la présence de

9.3 Summary of the downstream passability assessment method

The groups obtained by hierarchical analysis were used to assign a downstream passability rank for eel with respect to waterfall height and type of use (hydroelectric production vs other usages). In contrast to the assessment of upstream passability, no validation could be conducted *a posteriori* for downstream passability using CEHQ data. During the writing of this report, no data was available concerning the presence of turbines for hydroelectric dams (a point that needs to be

turbines pour les barrages hydroélectriques (une information cruciale) ou encore sur la présence d'un dispositif de franchissement facilitant la dévalaison. L'absence de ces données ne permet pas d'établir une grille d'évaluation de la franchissabilité qui soit articulée car celle-ci devrait mieux refléter les taux de mortalité d'anguilles observés aux barrages de type hydroélectrique.

addressed) or the existence of a route facilitating downstream passage. Until more information is available on hydroelectric dams, the downstream passability assessment grid provides only a crude metric of passability. Once available, mortality rates of eel at hydroelectric dams should be factored in the assessment grid.

9.4 Bilan sur la méthode d'évaluation de la franchissabilité amont et aval

Somme toute, à la lumière des résultats des analyses selon les critères d'évaluation retenus, il semble que la problématique de franchissement est plus importante en montaison (amont), qu'elle ne peut l'être en dévalaison (aval). Néanmoins, l'évaluation de la franchissabilité amont et aval pour l'anguille aurait été sans aucun doute plus adéquate si l'expertise avait été menée sur le terrain. D'ailleurs, l'évaluation de la franchissabilité des obstacles par l'anguille européenne à l'aide d'inventaires sur le terrain constitue une mesure de gestion prioritaire selon le *Plan de Gestion Anguille de la France* (Anonyme 2007). Sur le terrain, la franchissabilité des barrages est déterminée *in situ* par l'observation de différents critères utilisés spécifiquement en vue d'évaluer le franchissement par l'anguille.

9.4 Summary of the upstream and downstream passability assessment method

All in all, in light of the results of analyses based on the selected criteria, it appears that upstream passage is more problematic than downstream passage. Nevertheless, the assessment of upstream and downstream passability for eel would have been more adequate if it had been conducted in the field. Moreover, the assessment of obstacle passability for European eel using field inventories is a priority management measure according to the *Plan de Gestion Anguille de la France* (Anonyme 2007). In the field, passability of dams is determined *in situ* through the observation of various criteria used to assess eel passage.

Des visites sur le terrain seraient donc indiquées afin de valider certaines données sur chacun des barrages et de raffiner la grille établie pour l'évaluation de leur franchissabilité pour l'anguille. Les cotes de franchissabilité attribuées pourraient aussi être être confrontées aux

A field survey would be valuable in order to validate some of the data on dams as well as to refine the assessment grid established to evaluate the importance of obstacles to eel passage. The passability ranks assigned should also be compared with field observations

données de présence/absence ou de densité des anguilles dans les biefs amont de quelques bassins versants aux caractéristiques physiques différentes les unes des autres.

on eel presence/absence or population density upstream of obstacles on upper reaches of some watersheds with different physical characteristics.

10.0 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Centre d'expertise hydrique (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs) qui a fourni la base de données des barrages, Gontrand Pouliot, Serge Proulx et le personnel du SIGHAP (Système d'information pour la gestion du poisson) au MPO qui ont aidé à faire un premier examen des données, Yves Mailhot (MRNF) et Jean-Guy Jacques (MPO) qui ont commenté une version antérieure, et Carolyn Perkes qui a assuré la traduction du français vers l'anglais. Le projet a été soutenu par une contribution financière du SARCEP (MPO).

10.0 ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the Centre d'expertise hydrique (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs) who provided access to the database of the dams; Gontrand Pouliot, Serge Proulx, and the staff of the Fish Habitat Management Information System (FHAMIS -DFO) who assisted with preliminary analyses; Yves Mailhot (MRNF) and Jean-Guy Jacques (MPO) for their comments on an earlier version of the text; and Carolyn Perkes who translated the original French version to English. The work was supported through SARCEP funding (DFO).

11.0 RÉFÉRENCES / 11.0 REFERENCES

Anonyme. 2007. Plan de gestion anguille de la France. Volet local Garonne-Dordogne-Charente-Seudre-Leyre. République Française. Préfecture de la région aquitaine. 39 pages

Baisez, A., et Laffaille, P. 2005. Un outil d'aide à la gestion de l'anguille: le tableau de bord anguille du bassin Loire. Bull. Fr. Pêche Piscic. **378-379**: 115-130.

Boubée, J., and Williams, E. 2006. Downstream passage of silver eels at a small hydroelectric facility. Fish. Manage. Ecol. **13**(3): 165-176.

Caissie, D. 2006. River discharge and channel width relationships for New Brunswick rivers. Can. Tech. Rep Fish. Aquat. Sci. **2637**: vi+26 pages.

Caissie, D., and Robichaud, S. 2009. Towards a better understanding of the natural flow regimes and streamflow characteristics of rivers of the Maritime Provinces. Can. Tech. Rep Fish. Aquat. Sci. **2843**: viii+53 pages.

Centre d'expertise hydrique du Québec. 2010. Répertoire des barrages [en ligne]. URL : http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/ (page consultée le 30 juin 2010 / page accessed 30 June 2010).

Dagrève, D. 2005. Impact des barrages sur la répartition de deux espèces de migrateurs amphibiotiques en Bretagne: le saumon atlantique (*Salmo salar*) et l'anguille européenne (*Anguilla anguilla*). Rapport de stage pour l'obtention du Master professionnel en gestion intégrée des bassins versants. Université de Rennes, 37 p.

Desrochers, D. 1995. Suivi de la migration de l'anguille d'Amérique (*Anguilla rostrata*), 1994. Milieu et associés Inc. pour le service Milieu naturel, vice-présidence Environnement, Hydro-Québec, 107 p.

Desrochers, D. 2009. Suivi des passes migratoires à anguille de la centrale de Beauharnois et du barrage de Chambly, 2009. Milieu et associés Inc. pour l'unité Environnement, division Production, Hydro-Québec, 84 p.

Dutil, J., Dumont, P., Cairns, D., Galbraith, P., Verreault, G., Castonguay, M., and Proulx, S. 2009. *Anguilla rostrata* glass eel migration and recruitment in the estuary and Gulf of St Lawrence. J. Fish Biol. **74**(9): 1970-1984.

Garson, D. 2010. Cluster analysis [en ligne / online]. URL: http://faculty.chass.ncsu.edu/garson/PA765/cluster.htm (page consultée le 30 juin 2010 / page accessed 30 June 2010).

Gillis, G. 1998a. Environmental effects on undulatory locomotion in the American eel *Anguilla rostrata*: kinematics in water and on land. J. Exp. Biol. **201**(7): 949-961.

Gillis, G. 1998b. Neuromuscular control of anguilliform locomotion: patterns of red and white muscle activity during swimming in the American eel *Anguilla rostrata*. J. Exp. Biol. **201**: 3245-3256.

Gillis, G. 2000. Patterns of white muscle activity during terrestrial locomotion in the American eel

(*Anguilla rostrata*). J. Exp. Biol. **203**(3): 471-480.

He, Z., Xu, X., and Deng. S. 2005. Clustering mixed numeric and categorical data: a cluster ensemble approach. oai:arXiv.org:cs/0509011.

Hoffmann, M. 2008. Modélisation de l'impact des ouvrages sur les densités d'anguilles, dans le bassin Loire-Bretagne. Rapport de stage pour l'obtention du Master II en expertise et gestion de l'environnement littoral. Institut universitaire européen de la Mer de Brest, 81 p.

Huang, Z. 1998. Extensions to the k-means algorithm for clustering large data sets with categorical values. Data Mining and Knowledge Discovery **2**(3): 283-304.

Ibbotson, A., Smith, J., Scarlett, P., and Aprhamian, M. 2002. Colonisation of freshwater habitats by the European eel *Anguilla anguilla*. Freshwat. Biol. **47**(9): 1696-1706.

Imbert, H., De Lavergne, S., Gayou, F., Rigaud, C., and Lambert, P. 2008. Evaluation of relative distance as new descriptor of yellow European eel spatial distribution. Ecol. Freshwat. Fish **17**(4): 520-527.

Larinier, M. 2000. Dams and fish migration. Contributing paper prepared for Thematic Review II.1: Dams, ecosystem functions and environmental restoration. World Commission on Dams, 29 p.

Larinier, M., et Dartiguelongue, J. 1989. La circulation des poissons migrateurs: le transit à travers les turbines des installations hydroélectriques. Bull. Fr. Pêche Piscic. **312-313**: 1-87.

Larinier, M., et Travade, F. 1998. Petits aménagements hydroélectriques et libre circulation des poissons migrateurs. La Houille Blanche **8**: 46-51.

Larinier, M., et Travade, F. 1999. La dévalaison des migrateurs: problèmes et dispositifs. Bull. Fr. Pêche Piscic. **353-354**: 181-210.

Larinier, M., and Travade, F. 2002. Downstream migration: problems and facilities. Bull. Fr. Pêche Piscic. **364**(Suppl - Chap. 13): 181-210.

Larinier, M., M. Chanseau, C. Rigaud, P. Steinbach. 2006. Éléments d'aide à la définition d'une stratégie de restauration des axes de migration de l'anguille. Rapport du CEMAGREF. 23 p.

Legault, A. 1988. Le franchissement des barrages par l'escalade de l'anguille. Etude en Sèvre Niortaise. Bull. Fr. Pêche Piscic. **308**: 1-10.

Legault, A. 1993. Management of obstacles to eel migration. Association pour le développement de l'aquaculture, Bordeaux (France). Rapport no 37, 32 p.

Legault, A., Acou, A., Guillouët, J., et Feunteun, E. 2003. Suivi de la migration d'avalaison des anguilles par une conduite de débit réservé. Bull. Fr. Pêche Piscic. **368**: 43-54.

Lelièvre, M., et Steinbach, P. 2008. État migratoire de la Sioule: expertise détaillée de l'axe Sioule et de l'impact des ouvrages sur la circulation des poissons migrateurs. Association LOGRAMI et Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA). URL: http://www.combrailles.com/content/download/4663/44568/file/Rapport%20Contexte%20Migrato

ire%20de%20la%20Sioule%20V4.pdf

Leprevost, G. 2007. Développement d'un indicateur pour caractériser l'impact migratoire sur le stock d'anguille européenne à l'échelle des bassins. Rapport de stage pour l'obtention de la maîtrise. Institut d'aménagement de la Vilaine et Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), 94 pages. URL: http://www.eptb-vilaine.fr/site/telechargement/migrateurs/publis/Leprevost2007.pdf

Muchiut, S., Susperregui, N., et Oroz-Urrizalki, I. 2007. Guide de remplissage des fiches terrain «Obstacles à la migration». Volet environnement du programme Indicang. 21 p. URL: http://www.ifremer.fr/indicang/documentation/pdf/liste-annexes-guide-method.pdf

Normandeau Associates Inc., and Skalski, J.R. 2000. Estimation of survival of American eel after passage though a turbine at the St. Lawrence-FDR power project, New York. Final report prepared for New York Power Authority, White Plains, New York

Porcher, J. 1992. Les passes à anguilles. Bull. Fr. Pêche Piscic. **326-327**: 134-142.

Quinn, G.P., and Keough, M.J. 2002. Experimental design and data analysis for biologists. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 537 p.

Rezanková. H. 2009. Cluster analysis and categorical data. Statistika 3: 216-232.

Richkus, W., and Dixon, D. 2003. Review of research and technologies on passage and protection of downstream migrating catadromous eels at hydroelectric facilities. *In* Biology, management and protection of catadromous eels. *Edited by* D.A. Dixon. Am. Fish. Soc. Symp. **33**: 377-388.

Smogor, R., Angermeier, P., and Gaylord, C. 1995. Distribution and abundance of American eels in Virginia streams: tests of null models across spatial scales. Trans. Am. Fish. Soc. **124**(6): 789-803.

Solomon, D., and Beach, M.H. 2004. Fish pass design for eel and elver (Anguilla anguilla). Research and Development Technical Report W2-070/TR1. Environment Agency, UK. 92 p.

Steinbach, P. 2001. Effets cumulés sur les poissons migrateurs, état et restauration des grands axes de migration du bassin de la Loire. Hydroécol. Appl. **13**(2): 115-130.

Steinbach, P. 2006. Expertise de la franchissabilité des ouvrages hydrauliques transversaux par l'anguille dans le sens de la montaison. Conseil Supérieur de La Pêche. Note méthodologique. 16 p.

Steinbach, P. 2009. Emprise des ouvrages et caractérisation de leurs pressions sur les hydrosystèmes diganostic à l'échelle du bassin Loire-Bretagne. 10ième carrefour des gestions locales de l'eau. Office national de l'eau et des milieux aquatiques (ONEMA), 24 pages. URL: http://www.carrefour-eau.com/res/cs_osteinbach.pdf

Systat 12. 2007. Statistics I. SYSTAT Software, Inc. San Jose, USA. 493 p.

Tabachnick, B.G., and Fidell, L.S. 2001. Using multivariate statistics. Allyn and Bacon, Needham Heights, MA, USA. 966 p.

Therrien, J., et Verreault, G. 1998. Évaluation d'un dispositif de dévalaison et des populations d'anguilles en migration dans la rivière Rimouski. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction régionale du Bas-Saint-Laurent, Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune et Groupe-conseil Génivar Inc.. viii+37 p.

Travade, F. 2005. Le franchissement des aménagements hydroélectriques par les poissons migrateurs: l'expérience EDF. La Houille Blanche **3**: 60-68.

Tremblay, V. 2009. Reproductive strategy of female American eels among five subpopulations in the St. Lawrence River watershed. *In* Eels at the edge: science, status, and conservation concerns. *Edited by* J.M. Casselman and D.K. Cairns. Am. Fish. Soc. Symp. **58**: 85-102.

Van Ginneken, V., Antonissen, E., Müller, U., Booms, R., Eding, E., Verreth, J., and van den Thillart, G. Eel migration to the Sargasso: remarkably high swimming efficiency and low energy costs. J. Exp. Biol. **208**: 1329-1335.

Verreault, G., and Dumont, P. 2003. An estimation of American eel escapement from the upper St. Lawrence River and Lake Ontario in 1996 and 1997. *In* Biology, management and protection of catadromous eels. *Edited by* D.A. Dixon. Am. Fish. Soc. Symp. **33**: 243-251.

Verreault, G., Pettigrew, P., Tardif, R., and Pouliot, G. 2003. The exploitation of the migrating silver American eel in the St. Lawrence River estuary, Québec, Canada. *In* Biology, management and protection of catadromous eels. *Edited by* D.A. Dixon. Am. Fish. Soc. Symp. **33**: 225-234.

Annexe A. Sortie statistique de l'ACP.
Appendix A. Statistical output of PCA.

Matrix to be Factored					
	L10DEBCAL	L10CAPRET	L10HAUTRET	L10HAUT	L10LONG
L10DEBCAL	1.000				
L10CAPRET	0.620	1.000			
L10HAUTRET	0.337	0.397	1.000		
L10HAUT	0.493	0.559	0.861	1.000	
L10LONG	0.299	0.517	0.431	0.588	1.000

Latent Roots (Eigenvalues)				
1	2	3	4	5
3.067	0.868	0.640	0.322	0.103

Empirical Upper Bound for the First Eigenvalue : 3.501

Chi-square Test that All Eigenvalues are Equal

N	:	5 443.000
Chi-square	:	15 615.610
df	:	10.000
p-value	:	0.000

Chi-square Test that the Last 3 Eigenvalues are Equal

Chi-square	:	4 043.448
df	:	4.635
p-value	:	0.000

Latent Vectors (Eigenvectors)		
	1	2
L10DEBCAL	0.392	-0.629
L10CAPRET	0.448	-0.464
L10HAUTRET	0.453	0.524
L10HAUT	0.521	0.314
L10LONG	0.412	0.131

Standard Error for Each Eigenvector Element		
	1	2
L10DEBCAL	0.007	0.018
L10CAPRET	0.006	0.013
L10HAUTRET	0.006	0.018
L10HAUT	0.004	0.011
L10LONG	0.007	0.036

Component Loadings		
	1	2
L10DEBCAL	0,687	-0,586
L10CAPRET	0,785	-0,432
L10HAUTRET	0,793	0,488
L10HAUT	0,912	0,292
L10LONG	0,721	0,122

Variance Explained by Components	
1	2
3,067	0,868

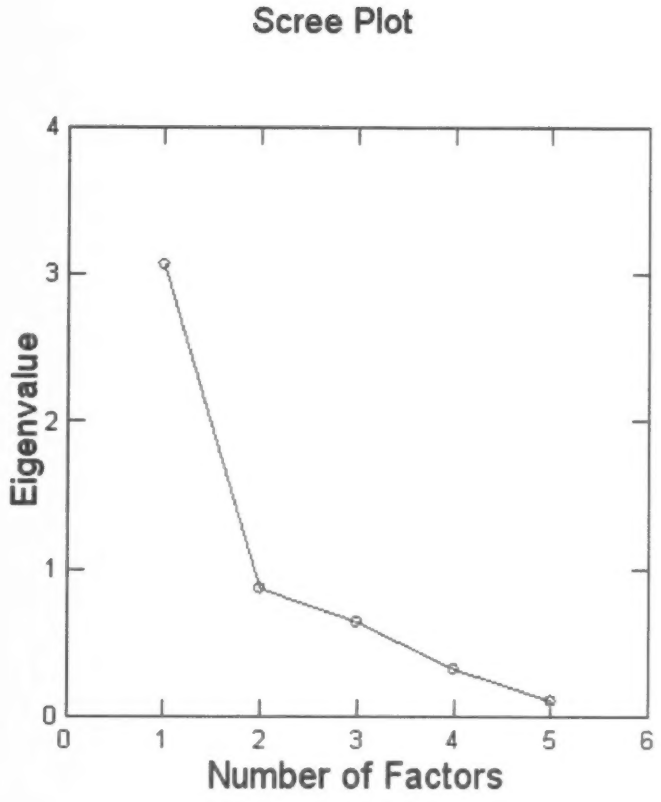
Percent of Total Variance Explained	
1	2
61,332	17,361

Rotated Loading Matrix (VARIMAX, Gamma = 1,000000)		
	1	2
L10DEBCAL	0,169	0,887
L10CAPRET	0,342	0,828
L10HAUTRET	0,924	0,116
L10HAUT	0,894	0,342
L10LONG	0,639	0,356

"Variance" Explained by Rotated Components	
1	2
2,206	1,729

Percent of Total Variance Explained	
1	2
44,117	34,576

Differences: Original Minus Fitted Correlations or Covariances					
	L10DEBCAL	L10CAPRET	L10HAUTRET	L10HAUT	L10LONG
L10DEBCAL	0,185				
L10CAPRET	-0,172	0,197			
L10HAUTRET	0,078	-0,015	0,133		
L10HAUT	0,039	-0,030	-0,004	0,084	
L10LONG	-0,124	0,004	-0,200	-0,104	0,466



Factor Coefficients	1	2
L10DEBCAL	-0.248	0.667
L10CAPRET	-0.112	0.548
L10HAUTRET	0.553	-0.277
L10HAUT	0.443	-0.077
L10LONG	0.271	0.037